



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Procedimento para seleção de motor e bateria para veículo elétrico.

Por,
Marcos Vinícius de Melo Orrico

Brasília, Julho de 2013



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Procedimento para seleção de motor e bateria para veículo elétrico.

POR,

Marcos Vinícius de Melo Orrico

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Rafael Amaral Shayani UnB/ ENE
(Orientador)

Profa. Dianne Magalhães Vianna, UnB/ MEC

Engenheiro Flavio Azevedo Alexandre

Brasília, julho de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

MARCOS VINICIUS DE MELO, ORRICO	
Procedimento para seleção de motor e bateria para veículo elétrico.	
[Distrito Federal] 2013.	
xvii, 123p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2013). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.	
1.Motor	2.Otimização
3.Bateria	4.Veículo elétrico
I. Mecatrônica/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORRICO, M. V. M., (2013). Otimização do dimensionamento de um sistema de motor elétrico e bateria para veículo elétrico. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 16/08/2013.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcos Vinicius de Melo Orrico.

Procedimento para seleção de motor e bateria para veículo elétrico.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marcos Vinicius de Melo Orrico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, força presente e constante em minha caminhada. Agradeço também os meus pais e irmãos, minha sustentação e apoio incondicional nos momentos difíceis. Pela paciência e orientação do professor orientador Rafael Amaral Shayani À Julliana Luniere, Luisa Guerra e Yasmin Pimentel, pela importante revisão do texto. À Amaranta Hayata pelo auxílio na formatação. Ao PROJETO CICLAR e a professora coordenadora do projeto, Dianne Magalhães Vianna, inspiração que motivou esse trabalho, ao Decanato de extensão e aos grupos MMCT, Ches, e Bit, sempre presentes nos momentos de necessidade.

Marcos Vinícius de Melo Orrico

RESUMO

O presente documento trata sobre o uso e especificação de motores e baterias na dinâmica veicular, inspirado por uma necessidade de escolha acerca desses aparelhos pelo projeto CICLAR - veículo elétrico para coleta seletiva no campus Darcy Ribeiro, em um momento onde houve dúvidas sobre a melhor forma de se especificar qual seria a opção mais indicada para o tipo de aplicação cabível ao projeto. No texto são expostos ao leitor os principais modelos existentes no mercado para esses equipamentos, suas características, como por exemplo, a capacidade de uma bateria ou o tipo de corrente de alimentação de um motor, os tipos de controle possíveis e uma comparação de vantagens e desvantagens. Para exprimir a aderência ao método, foram escolhidos variáveis como a sustentabilidade, peso e segurança, itens que esclarecem os pontos mais importantes ao se escolher um banco de baterias tracionarias ou motor elétrico. É então montada uma tabela com a colocação de cada um dos objetos qualificados, resultando em uma classificação para cada um deles. O objetivo principal é autenticar um modelo de otimização que possa ser utilizado no momento da escolha do melhor par de motor-bateria tanto para as tendências encontradas atualmente pelo mercado como para casos mais específicos, permitindo a possibilidade de alternativas para uma ampla variedade de aplicações. Em sua última parte, validam-se os modelos propostos através de análise de artigos e dados de veículos que já estão à venda em alguns países.

Palavras Chave: motor; bateria; otimização; veículo elétrico;

ABSTRACT

This paper attends with the use and specification of motors and batteries in the vehicle dynamics, inspired by a need for selection on these devices by the project CICLAR - electric vehicle for collection at Campus Darcy Ribeiro, in a time where there were doubts about the best way to specify what would be the most appropriate option for the type of application appropriate to the project. In this text, the reader are explained about the main designs in the market for such equipment, the characteristics such as the capacity of a battery or the type of current supply of an engine, the types of possible control and a comparison of advantages and disadvantages. To express adherence to method, variables were chosen as sustainability, weight and safety items that clarify the most important points when choosing a traction battery bank or electric motor. A table is then assembled by placing each of the objects qualified resulting in a rating for each. The main objective is to authenticate an optimization model that can be used when choosing the best pair of motor-battery both for tendency currently found in the market as to a more specific adhibition, allowing the possibility of alternatives for a wide variety of applications. In its final part, the models proposed by analyzing articles and data from vehicles that are already on sale in some countries are validated.

Keywords: motor; battery; optimization; electric vehicle;

SUMÁRIO

Conteúdo

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - BATERIA.....	3
2.1 PRINCIPAIS PARTES DE UMA BATERIA	3
2.2 TIPOS DE BATERIAS.....	4
2.2.1 Baterias primárias	4
2.2.2 Baterias secundárias.....	5
2.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE UMA BATERIA.....	6
2.3.1 Circuito Equivalente	6
2.3.2 Tensão nominal [12]	8
2.3.3 Tensão de circuito aberto(V) [7], [13]:	8
2.3.4 Tensão de corte(V) [12]:	8
2.3.5 Tensão de Flutuação (V) [13]:	8
2.3.6 Estado de carga(%)	8
2.3.7 Profundidade de descarga (%) [13]:.....	9
2.3.8 Taxa de carga/descarga (C's) [12]:	10
2.3.9 Auto-Descarga(%) [13]:	10
2.3.10 Capacidade energética nominal (Ah) [13]:	10
2.3.11 Energia específica (Wh/kg) [12]:	11
2.3.12 Densidade energética (Wh/L) [12]:.....	11
2.3.13 Número de ciclos [5]:	11
2.4 BATERIAS TRACIONARIAS	11
2.4.1 Chumbo-Ácido	11
2.4.2 Níquel Cádmio	13
2.4.3 NiMH - Níquel-Metal Hidreto.....	15
2.4.4 Zebra	16
2.4.5 Li-íon.....	17
2.4.6 Zinco-Ar	23
CAPÍTULO 3 - MOTORES ELÉTRICOS.....	29
3.1 Motor de corrente contínua com rotor bobinado	30
3.1.1 Ligação SHUNT	32
3.1.2 Ligação em série.....	32
3.1.3 Controladores.....	33
3.2 Motores de Corrente Alternada	38
3.2.1 Motor síncrono de corrente alternada, escovado e excitado por corrente contínua (SBM Motor).	38
3.2.3 Motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua (SPM Motor).	44
3.2.4 Motor de corrente alternada de indução (Induction Motor).	45
3.2.5 Motor de corrente alternada de relutância (Reluctance Motor).	49
CAPÍTULO 4 - REQUISITOS.....	54
4.1 Baterias	54
4.1.1 Eficiência	54
4.1.2 Carga Máxima Nominal	55
4.1.3 Custo	55
4.1.4 Ciclos.....	56
4.1.5 Profundidade de descarga.....	57
4.1.6 Manutenção.....	58
4.1.7 Energia específica.....	60
4.1.8 Densidade energética	60

4.1.9 Sustentabilidade	60
4.1.10 Segurança	61
4.2 Motores	62
4.2.1 Eficiência	62
4.2.2 Manutenção	63
4.2.3 Controle	63
4.2.4 Custo	64
4.2.5 Peso	64
4.3 Sinergia	65
4.3.1 Descarga Máxima Nominal	65
4.3.2 Descarga Máxima	65
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA	68
5.1 Método Absoluto	68
5.2 Metodologia por estudo de caso	71
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISE	79
6.1. Valor absoluto	79
6.2. Estudo de caso	82
6.3. Comparação entre metodologias	86
6.4. Eliminação de candidatos utilizando parâmetros de desvantagens	88
6.4.1 Baterias	89
6.4.2 Motores	92
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO	97
Bibliografia.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Principais componentes de uma bateria (baseado em [3] e [4]).	3
Figura 2.2. Principais tipos de baterias (baseado em [4], [5], [6], [7], [8] e [9]).	4
Figura 2.3. Circuito equivalente baseado em Thevenin	7
Figura 2.4 - Circuito equivalente baseado em impedância	7
Figura 2.5 - Exemplo de curva de descarga (baseado em [11])	8
Figura 2.6 - Exemplo de ciclos de uma bateria (baseado em [11]).	11
Figura 2.7 - Elementos químicos presentes na reação química das baterias de chumbo-ácido (baseado em [9])	12
Figura 2.8 - Efeito de memórias nas baterias de níquel-cadmio (baseado em [8]).	14
Figura 2.9 - Estados da carga para bateria do tipo ZEBRA (baseado em [18])	17
Figura 2.10 (Autorizada Jornal Virtual)	19
Figura 2.11 - Formanto de bolsa da bateria do tipo lítio polímero	20
Figura 2.12, Estrutura atômica das baterias de manganês. (Concedido [7]).	21
Figura 2.13 - Diminuição da capacidade de uma bateria com a passagem dos ciclos (baseado em [11])	22
Figura 2.14 - Principais componentes bateria zinco-ar	24
Figura 3.1 - Comportamento dos principais componentes de um motor de corrente contínua	31
Figura 3.2 - Exemplo de ligação do tipo SHUNT	32
Figura 3.3 - Exemplo de ligação do tipo Série	33
Figura 3.4 - Quadrantes de operação	34
Figura 3.5 - Diagrama de controle para motor que funciona em somente uma direção	34
Figura 3.6: Diagrama de controle para uma direção com proteção.	35
Figura 3.7 - Controle possibilitando quadrantes "I" e "III".	35
Figura 3.8 - Diagrama de controle completo	36
Figura 3.9 - Gráfico velocidade versus torque para controle da velocidade.	37
Figura 3.10 - Gráfico de funcionamento de PWM	38
Figura 3.11 - Funcionamento de um motor de imã permanente síncrono	40
Figura 3.12 - Ligações para corrente alternada	41
Figura 3.13 - Malha fechada do controle do motor de imã permanente síncrono	44
Figura 3.14 - Fluxograma do sistema do motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua	45
Figura 3.15 - Fluxograma do sistema do Motor de corrente alternada de indução	49
Figura 3.16 - Funcionamento do motor de relutância chaveada (parte 1)	50
Figura 3.17 - Funcionamento do motor de relutância chaveada (parte 2).	50
Figura 3.18 - Controle de ponte assimétrica.	51
Figura 4.1 – Gráfico da cotação dos principais sistemas do veículo do projeto Ciclar.	56
Figura 4.2: Conector de bateria chumbo ácido.	59
Figura 4.3 - Conector de bateria de fosfato ferroso de lítio. (Cedido por Hipowergroup, Anexo H)	60
Figura 4.4: Eficiência do motor de acordo com a rotação	63
Figura 5.1 - Imagem do espaço que as baterias ocupam dentro do veículo Ciclar	73
Figura 5.2 - Gráfico da velocidade desenvolvida pelo tempo da rotina de teste	73
Figura 5.3 - Gráfico da função instantânea requerida em função do tempo	74
Figura 6.1: Nota das baterias método absoluto.	80
Figura 6.2: Nota motores utilizando método absoluto.	81
Figura 6.3: Nota das baterias utilizando o método estudo de caso.	83
Figura 6.4: Nota motores utilizando método estudo de caso.	84
Figura 6.5: Nota das baterias utilizando o método estudo de caso hipotético.	83
Figura 6.6: Nota motores utilizando método estudo de caso hipotético.	84
Figura 6.7: Comparação entre métodos para baterias.	87
Figura 6.8: Comparação entre métodos para motores.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - baterias (baseado em [4, 5, 6, 7, 10, 14, 16, 17, 19, 20,21])	25
Tabela 2.2 - Especificações baterias (baseado em [4, 5, 6, 7, 10, 14, 16, 17, 19, 20,21])	26
Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens da bateria de chumbo-ácido.....	26
Tabela 2.4 - Vantagens e Desvantagens da bateria de níquel-cádmio.....	27
Tabela 2.5 - Vantagens e Desvantagens da bateria de níquel metal hidreto	27
Tabela 2.6 - Vantagens e Desvantagens da bateria Zebra	27
Tabela 2.7 - Vantagens e Desvantagens da bateria de Lítio-Íon	27
Tabela 2.8 - Vantagens e Desvantagens da bateria de polímero de lítio	27
Tabela 2.9 - Vantagens e Desvantagens da bateria de lítio manganês	27
Tabela 2.10 - Vantagens e Desvantagens da bateria de fosfato ferroso de lítio	27
Tabela 2.11 - Vantagens e Desvantagens da bateria de zinco-ar.....	28
Tabela 3.1 - Tabela-verdade para controle completo	36
Tabela 3.2 - Motor de corrente contínua com rotor bobinado (<i>DC Wound Motors</i>).....	51
Tabela 3.3 - Motor síncrono de corrente alternada, escovado e excitado por corrente contínua (SBM Motor)	52
Tabela 3.4 - Motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua (SPM Motor)	52
Tabela 3.5 - Motor de corrente alternada de indução (Induction Motor)	52
Tabela 3.6 - Motor de corrente alternada de relutância (Reluctance Motor).....	53
Tabela 4.1 - Cotação dos principais sistemas do veículo do projeto Ciclar	55
Tabela 4.2 - Exemplos de tempo de duração das baterias de acordo com a regularidade de uso.....	57
Tabela 4.3 - Orçamento de motor PM18 e controlador PMC18A Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.4 - Principais valores datasheets bateria	66
Tabela 4.5 - Principais valores datasheets bateria parte dois	66
Tabela 4.6 - Parâmetros para determinação da rotina de otimização.....	67
Tabela 5.1 - Número de variáveis por categoria	68
Tabela 5.2 - Pesos das variáveis para o método absoluto	69
Tabela 5.3 - Valores para o método baseado em estudo de caso	70
Tabela 5.4 - Peso das variáveis método estudo de caso	74
Tabela 5.5 - Valores para método baseado em estudo de caso	75
Tabela 5.6 - Peso das variáveis método estudo de caso hipotético.....	74
Tabela 5.7 - Valores para método baseado em estudo de caso hipotético	75
Tabela 6.1 - Notas das baterias utilizando o método absoluto	79
Tabela 6.2 - Notas dos motores utilizando o método absoluto	81
Tabela 6.3 - Notas das baterias utilizando o método estudo de caso	82
Tabela 6.4 - Notas dos motores utilizando o método estudo de caso	83
Tabela 6.5 - Fatores classificatórios.....	95
Tabela 6.6 - Fatores influenciadores do estudo de caso	96
Tabela 6.7 - Modelos desclassificados.....	97
Tabela 7.1 - Modelos mais utilizados de baterias e motores no mercado	97
Tabela 7.2 - Ranking das notas método absoluto.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

DC - *Direct Current*

BLPMDC – *Brushless Permanent Magnet Direct Current*

MIT – Motor de indução trifásica

SBM – *Synchronous brushed Motor*

SRM – *Switched Relutance Motor*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Dentre as principais motivações para o uso de veículos elétricos está o apelo ambiental e ecológico. Os veículos elétricos existem desde o início da indústria automobilística, mas vêm ganhando destaque atualmente uma vez que a demanda por tecnologias verdes vem aumentando junto à demanda tecnológica. Em uma comparação entre os veículos elétricos com os veículos de combustão interna, que emitem em média 21.71 gramas de dióxido de carbono por quilômetro rodado [1], percebemos que este último além de emitir monóxido de carbono e outros gases nocivos ao ser humano e natureza. Em contrapartida, os veículos que utilizam a energia elétrica são nocivos ao ambiente na fonte onde se transforma outras formas de energia em elétrica e em alguns casos, essa transformação não traz dano algum ao meio ambiente, como é o caso das conversões de energia eólica e solar. No cenário brasileiro, cuja energia utilizada é majoritariamente proveniente de hidroelétrica, pode existir dano ao ambiente no que tange a formação do lago que serve como reservatório para a usina de energia, porém após a instalação trata-se a mesma como uma fonte limpa e renovável.

Percebemos um número cada vez maior de projetos e modelos tanto na indústria automobilística como também em todos os demais setores industriais uma preocupação crescente com o meio ambiente e a sustentabilidade dos processos e produtos. O projeto CICLAR -Veículo elétrico para coleta seletiva no campo Darcy Ribeiro - UnB, criado pela professora Dianne Magalhães Vianna no ano de 2011, insere-se no contexto global de sustentabilidade, desenvolvimento tecnológico e reciclagem de produtos - temas de interesse e com grande sinergia. A equipe desse projeto propôs-se a conceber, projetar e fabricar um veículo elétrico dentro da própria faculdade, que seria responsável por coletar diversos tipos de materiais recicláveis dentro do campus.

Em uma das etapas do projeto fez-se necessário à escolha de um banco de baterias tracionárias e um motor elétrico, base sob a qual um veículo elétrico é capaz de funcionar. Como selecionar um conjunto eficiente, leve, não volumoso, sustentável, de preço acessível, seguro e com manutenção simples são alguns dos quesitos mais importantes para essa escolha. A maneira de se escolher como julgar a importância de cada uma dessas condições foi o que inspirou a proposta desta monografia.

O presente trabalho trata sobre dois dos itens mais importantes dentro da dinâmica veicular elétrica: motores e baterias e desenvolve uma metodologia capaz de aplicar uma avaliação dos melhores e piores modelos para uma aplicação de cunho geral ou, caso desejável, para um projeto mais específico. Apresentar-se-á uma revisão bibliográfica dividida em duas partes abordando esses dois equipamentos. No tópico baterias citam-se nove modelos encontrados no mercado, as vantagens e desvantagens de cada uma delas e a base de seu

funcionamento. No capítulo motores referenciam-se 5 tipos de motores, a forma de controle para um deles, a base de suas estruturas e suas principais características.

Na seção matérias e métodos são expostas as variáveis essenciais para se criar uma rotina capaz de otimizar a escolha de um par motor e bateria com base em tendências do mercado e também utilizando estudos de casos específicos. O objetivo principal desse arquivo é criar uma metodologia apropriada para classificar os diferentes tipos de motores e baterias em uma escala de maior ou menor aderência com os fatores mais importantes para o mercado e também a sua aplicabilidade em atividades de maior especificidade e que fogem às tendências da praça.

No assunto resultados encontra-se a classificação para cada uma das baterias e motores de acordo com a metodologia aplicada e faz-se uma avaliação dos métodos em comparação com a tendência de uso popular defendida nos artigos utilizados como referência.

Na conclusão os métodos de otimização são aferidos para que os mesmos sejam apontados como validados ou não validados, e são feitas considerações finais sobre a aplicabilidade em outros casos. A validade do método é alcançada através da comparação com o comportamento de mercado e o método de estudo de caso conclui que o projeto CICLAR escolheu uma das melhores combinações possíveis de motor e bateria, mas não a melhor de todas.

Essa trabalho auxilia a escolha de motores e baterias para pessoas leigas no assunto ou que desejam uma comparação mais profunda dos modelos apresentados no mercado.

CAPÍTULO 2 - BATERIA

Baterias são dispositivos que possuem a capacidade de armazenar energia química e transformá-la em energia elétrica através de uma reação de oxidação - redução. É um equipamento indispensável para qualquer aparelho portátil ou que não esteja conectado diretamente na rede elétrica, sendo utilizado em ampla escala e em ampla variedade de aplicações.

Alessandro Volta foi a primeira pessoa a construir um equipamento capaz de produzir corrente elétrica continuamente, em 1799[2]. O arranjo foi chamado de pilha voltaica, que consiste em camadas alternadas de zinco, tecido molhado e prata. A unidade de tensão do sistema internacional é chamada “Volt” em homenagem a Alessandro Volta por sua criação. Desde então, vários processos de inovação e tentativas de novos projetos de baterias ocorreram.

2.1 PRINCIPAIS PARTES DE UMA BATERIA

O princípio básico de funcionamento das baterias é baseado no processo da eletrólise, cujo fundamento é a transformação de energia elétrica em energia química (e vice-versa) através de um processo não-expontâneo, no qual ocorre a descarga de íons. Dois eletrodos, um positivo (cátodo) e o outro negativo (ânodo) são parcialmente mergulhados em um eletrólito (solução aquosa de íons), entre eles há uma barreira impedindo que os eletrodos se toquem, o que permite o fluxo de carga entre eles [3]. Abaixo a figura 2.1, representando o processo da eletrólise:

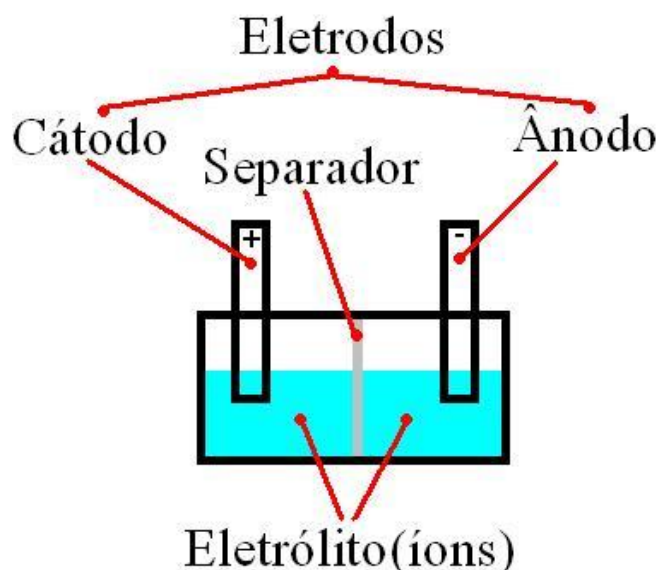


Figura 2.1. Principais componentes de uma bateria (baseado em [3] e [4]).

No caso de baterias automotivas, existem vários conjuntos contendo finas camadas de eletrodos com um separador entre cada par ânodo-cátodo. Esses aglomerados são enfileirados e ligados em série uns aos outros através de um conector metálico.

2.2 TIPOS DE BATERIAS

Podem-se dividir as baterias em duas categorias: aquelas que não são recarregáveis, ou primárias, e aquelas que podem ser recarregadas, ou secundárias [5]. A figura 2.2 abaixo mostra algumas das principais baterias que fazem parte dessas categorias.

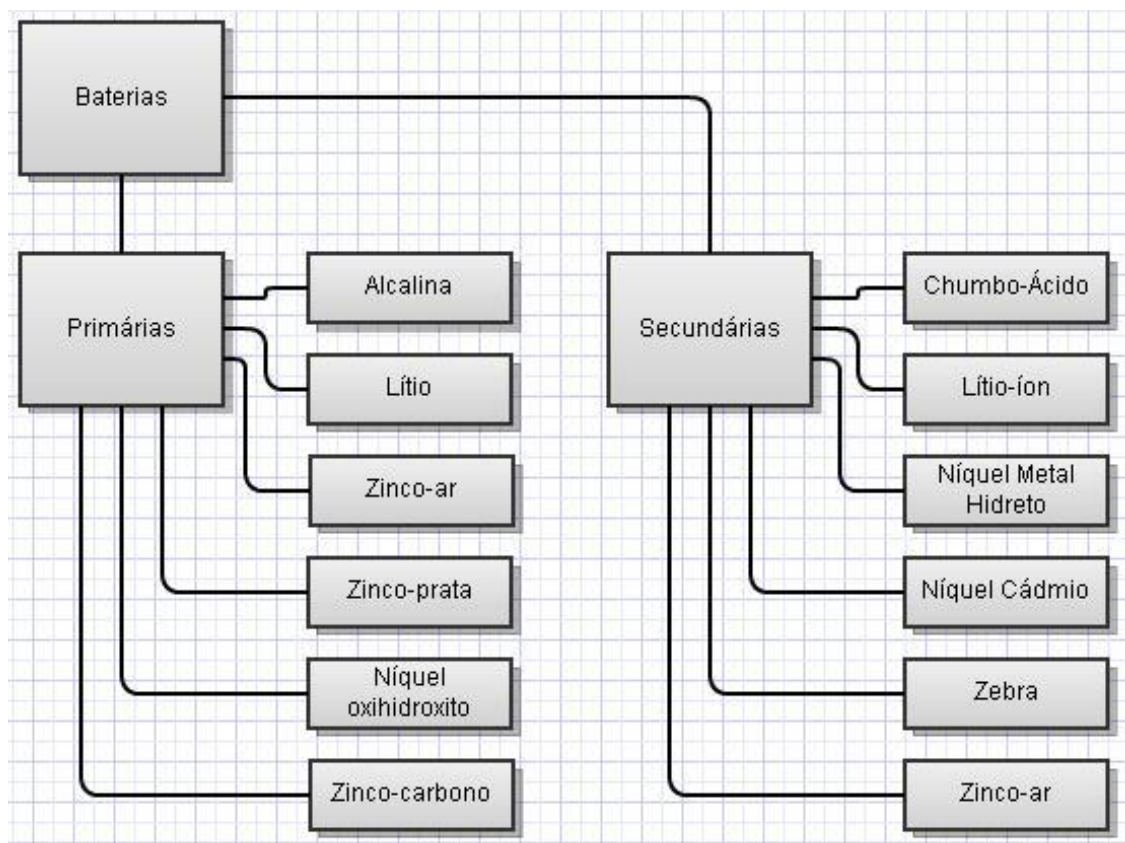


Figura 2.2. Principais tipos de baterias (baseado em [4], [5], [6], [7], [8] e [9]).

2.2.1 Baterias primárias

Baterias primárias são utilizadas uma única vez e depois devem ser descartadas ou recicladas, pois a reação química que ocorre não é reversível em pelo menos um dos eletrodos. Suas principais vantagens são [6], [7]:

- Auto-descarga pequena (conceito explicado no item 2.1.3.9);
- Mais baratas que as baterias secundárias;
- Grande variedade de produtos comerciais;
- Alta densidade energética; e
- São padronizadas.

As principais desvantagens incluem [6], [7]:

- Uso não aconselhável em aplicações com necessidade energética alta devido ao curto tempo de vida e a necessidade de troca constante;
- Eficiência baixa e
- Produz mais resíduos que as baterias secundárias.

Algumas aplicações importantes para as baterias [5], [6], [7]:

- Detectores de fumaça
- Lanternas
- Relógios
- Controle Remoto de televisão
- Brinquedos
- Rádios
- Aparelhos Auditivos

2.2.2 Baterias secundárias

As baterias secundárias são reutilizáveis através da recarga que, por meio de um processo químico reversível, é capaz de recuperar parte de sua capacidade energética. A energia da bateria irá diminuir de acordo com quantidade de uso, quanto maior a descarga mais energia será perdida, ao passo que quanto menor menos se perderá, mas ela diminui a cada ciclo de carga/descarga até o momento em que se chega a um valor em que a bateria torna-se inutilizável [5].

Vantagens das baterias do tipo secundárias [6], [7]:

- Apesar de o custo inicial ser maior, esse preço é diluído pelo número de recargas feitas, tendo um custo-benefício melhor a longo prazo;
- Melhor categoria para aplicações que exigem alta de potência;
- Vários modelos são ecologicamente corretos (não possuem metais pesados em sua composição).

Desvantagens desse tipo de bateria [6], [7]:

- Custo do carregador;
- Devido a uma menor estabilidade química dos materiais utilizados requer manuseio especial (boa parte das baterias de chumbo-ácido não podem ser viradas de lado, por exemplo), contenção em um material diferenciado e eliminação (ou reciclagem) fora dos padrões;
- Falta de um padrão;
- Auto-descarga maior que as baterias primárias.

Algumas aplicações possíveis para esse gênero [5], [6], [7]:

- Telefones
- Notebooks
- Equipamentos motorizados
- Câmeras/Filmadoras
- Barbeadores elétricos
- Instrumentos médicos

Outra ramificação dentro do sistema de baterias secundárias, é quanto à forma de descarga requerida, sendo que as duas mais comuns dentro da dinâmica veicular são as estacionárias e as tracionárias. A seguir breve descrição de suas principais características.

-Estacionárias: São baterias projetadas para alimentar sistemas que necessitam de uma potência muito alta durante curtos períodos de tempo. As baterias instaladas nos veículos a combustão convencionais são um bom exemplo desse tipo de bateria: durante a ignição o motor possui a necessidade de algumas centenas de amperes de corrente que são providos por uma bateria de chumbo-ácido de 12 V por um tempo muito curto (menor que 1 segundo). Essas baterias, porém, não suportam ciclos profundos de descarga (maiores do que 50% de sua capacidade) e caso sejam submetidas a este ciclo tornam-se inutilizáveis rapidamente [5].

-Tracionárias: Também chamadas de baterias de ciclo profundo, são capazes de fornecer uma corrente estável durante um longo período de tempo. Elas podem proporcionar um aumento de potência quando necessário, mas esse incremento é muito inferior ao valor que as baterias estacionárias conseguem. Outra característica das baterias tracionárias é a sua capacidade de suportar vários ciclos de descarga quase completa seguidamente, permitindo dessa forma um uso que seria impossível para as baterias estacionárias. Veículos elétricos utilizam esse tipo de bateria em seu sistema de potência de alimentação [5].

2.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE UMA BATERIA

2.3.1 Circuito Equivalente

Para fins de modelagem, pode-se simplificar o circuito das baterias em formas elétricas de muitas maneiras diferentes. Na figura 2.3 é apresentado as formas mais comuns[9], [10]:

2.3.1.1 Circuito equivalente baseado em Thevenin

Esse modelo é fundamentado em uma resistência em série com uma rede RC em paralelo, consegue prever com precisão as descargas causadas por auto-descarga através da de uma resistência em paralelo. Erros em leituras de tensão e corrente são menores que 5% da medida real e é o circuito mais utilizado atualmente para prever os parâmetros de uma bateria, como apresentado na figura 2.3.

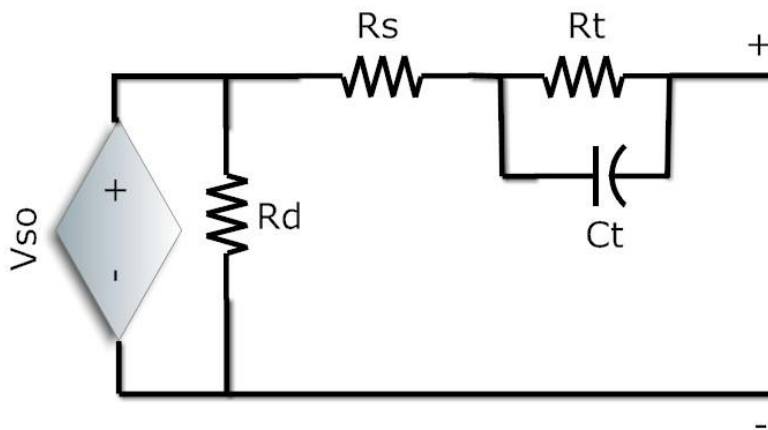


Figura 2.3. Circuito equivalente baseado em Thevenin

Legenda:

V_{so} : Tensão da bateria

R_d : Resistência de auto-descarga

R_s : Resistência Série

R_t : Resistência transitória

C_t : Capacitância transitória

2.3.1.2 Circuito equivalente baseado em Impedância

Esse método substitui a rede RC em paralelo por uma impedância em série com um indutor e desconsidera a resistência de auto-descarga. Essa ordenação se diferencia por conseguir prever com maior exatidão as tensões e correntes alternadas do sistema, porém para uma temperatura e estado de carga constantes [10].

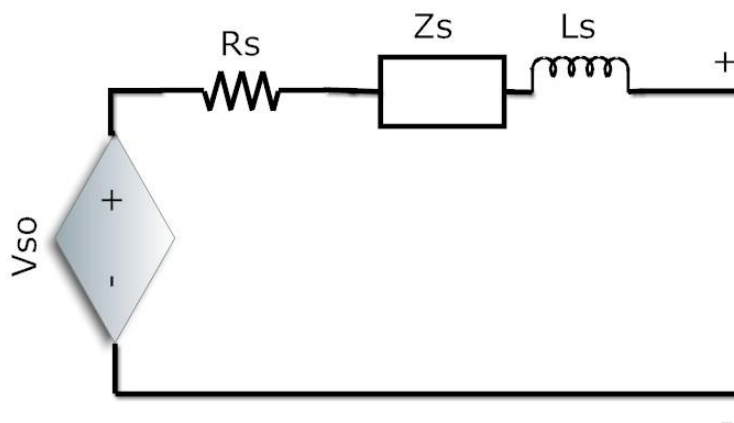


Figura 2.4 - Circuito equivalente baseado em impedância

Legenda:

V_{so} : Tensão da bateria

R_s : Resistência série

Z_s : Impedância equivalente série RLC

L_s : Indutância série

2.3.2 Tensão nominal [12]

Caracteriza-se por tensão nominal o valor no qual a bateria opera na maior parte do seu regime. Existem variações para quando a bateria está quase completamente carregada ou descarregada. A figura 2.5 exibe um exemplo desse efeito (no caso, a tensão nominal exibida é de 3.2 V, na qual a bateria passa 60% do seu ciclo de descarga):

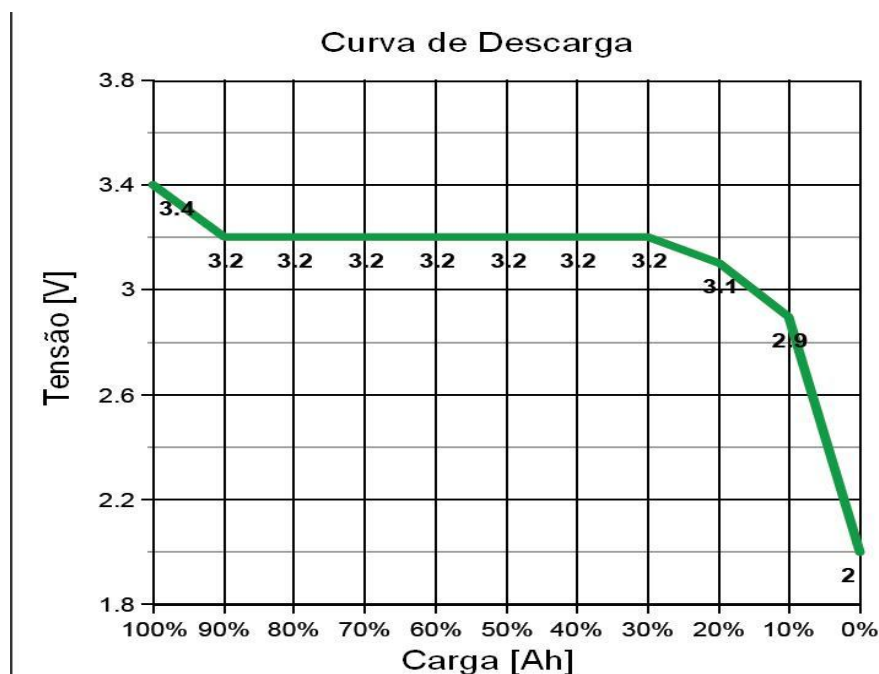


Figura 2.5 - Exemplo de curva de descarga (baseado em [11])

2.3.3 Tensão de circuito aberto(V) [7], [13]:

Tensão apresentada pela bateria quando é conectado um voltímetro aos seus terminais sem que qualquer tipo de carga esteja conectada. Algumas medidas de segurança e de recarga levam em consideração a tensão de circuito aberto.

2.3.4 Tensão de corte(V) [12]:

Variável que representa a tensão mínima apresentável pela bateria. Ao chegar nesse valor é interpretado que a bateria encontra-se completamente descarregada.

2.3.5 Tensão de Flutuação (V) [13]:

Um valor ligeiramente maior de tensão do que a tensão nominal e que é alcançado quando a carga da bateria encontra-se em 100%. Seu objetivo é compensar o efeito de auto-descarga que ocorre nas baterias.

2.3.6 Estado de carga(%)

Percentual de energia restante no acumulador, comparado com o seu total. Análogo do medidor de combustível de veículos a combustão. Existem quatro métodos possíveis para determinar esse valor, a saber [6]:

- a) Método Químico: essa metodologia só pode ser utilizada em baterias em que é possível ter acesso ao seu eletrodo líquido, como por exemplo, um dos tipos de baterias de chumbo-ácido, as células não seladas. Medições do pH ou massa específica são feitas para se chegar a porcentagem de carga restante na bateria.
- b) Método da Pressão: exclusivo para bateria de Níquel-Metal Hidreto, que possui a propriedade de mudar sua pressão interna de acordo com o estado da carga. Uma forma de melhorar esse método é levar em consideração a lei de Peulkert, uma expressão que é capaz de matematicamente prever sua capacidade de acordo com a taxa de descarga da bateria.
- c) Método da Tensão: basicamente são feitas medições da tensão em tempo real e então se compara o valor medido com a curva de tensão por estado de carga. Devem-se levar em consideração as mudanças causadas por efeito da temperatura e da corrente depreendida da bateria.
- d) Método da integração da corrente: pode ser utilizado no caso de qualquer bateria, atualmente é a que mais se aproxima dos valores reais de estado de carga. É fundamentado na integração da corrente medida durante todo o tempo de descarga do sistema. Como no método da tensão, o fator temperatura e a quantidade de corrente utilizada devem ser levados em consideração para aproximar ainda mais o método do valor quisto. Uma observação importante é que esse método deve ser calibrado regularmente, visto que, à medida que a bateria é descarregada, sua capacidade total diminui e isso deve ser levado em consideração para melhor aproximação.

2.3.7 Profundidade de descarga (%) [13]:

Percentual de energia, comparado com o seu total, do qual é permitido descarregar a bateria sem causar danos, como por exemplo, a diminuição dos seus ciclos. Todas as baterias possuem uma profundidade de descarga ideal do quanto devem ser descarregadas. Ultrapassar esse valor significa diminuir de uma forma agressiva o número de ciclos que é possível se utilizar a bateria. Em alguns casos extremos chega a causar danos permanentes à bateria, como a não reversibilidade de reação química ao se atingir o valor máximo de descarga e ainda assim tentar cobrar mais energia da bateria. Uma vez ultrapassada a profundidade de descarga de uma bateria, pode ser que a bateria não mais recarregue.

É possível atingir profundidade de descarga superior a 100% uma vez que baterias podem ter capacidade real maior que a nominal, o que não seria possível com os parâmetros como o estado de carga.

Outro fator a se considerar é o aumento do número de ciclos das baterias, caso estas sejam utilizadas em um valor inferior á profundidade de descarga, a seguir a caracterização de um exemplo cujos dados podem ser encontradas no anexo G. O número de ciclos que

apresentam quando são descarregadas em 80% é de 2000, um valor usual para as bateria de fosfato ferroso de lítio. Mas caso seja utilizado somente 70% da bateria por ciclo, esse valor sobe para 3000 ciclos, um aumento de 50% na vida útil em funcionamento da bateria, ocorrendo, em contrapartida, uma diminuição no valor de 10% absoluto no uso da carga.

2.3.8 Taxa de carga/descarga (C's) [12]:

Quantidade de energia fornecida (no caso de descarga) ou consumida (no caso de carga) pelo acumulador. A constante de medida "C" é uma comparação com a capacidade nominal, ou seja, se a bateria possui 50 Ah, 1C significa a descarga constante de 50 A, 3C a descarga constante de 150 A e C/2 a descarga constante de 25 A. Essa constante interfere diretamente no rendimento da bateria, com taxas muito altas de descarga diminuindo a eficiência do sistema e taxa muito altas de carga podendo danificar o equipamento.

2.3.8.1 Taxa de descarga ideal (C's) [5]:

Constante que define valor de corrente para o qual o aproveitamento da energia é de 100%.

2.3.8.2 Pico de descarga máxima (C's) [5], [6]:

Limite de C's possível por um curto período de tempo (entre 5 e 30 segundos) no caso de um pico de descarga. A limitação de tempo ocorre devido ao superaquecimento do sistema devido à corrente superior em comparação com o regime nominal.

2.3.8.3 Taxa de descarga contínua máxima (C's) [12]:

Constante que define a máxima corrente instantânea em regime nominal. Apesar de ser possível operar dentro desse limiar, existe uma perda considerável em praticamente todos os tipos de acumuladores.

2.3.8.4 Taxa máxima de carga (C's) [5]:

A carga feita em baterias possui duas fases: os primeiros 70% da carga são feitos a uma corrente constante e logo após passa-se ao consumo de energia através de tensão constante. Essa taxa máxima define para a primeira parte o patamar máximo de corrente possível para carregar.

2.3.9 Auto-Descarga(%) [13]:

Perda de energia, comparada com o total energético, que ocorre durante o período de um mês no caso de armazenamento.

2.3.10 Capacidade energética nominal (Ah) [13]:

Quantidade de corrente necessária para descarregar completamente a bateria em uma hora. A taxa de descarga, através de sua influência na eficiência, pode mudar essa variável no caso de uma exigência de corrente maior que a taxa ideal. Os valores apresentados

nesta variável são comuns para uma descarga “C” tal que a eficiência da bateria seja de 100%. Em alguns casos, esse valor pode ser, por exemplo, de C/20 ou então 2C.

2.3.11 Energia específica (Wh/kg) [12]:

Quantidade de energia por unidade de peso, também chamado de densidade de energia gravimétrica. Possui dependência com o processo químico e na forma em que os componentes são acomodados.

2.3.12 Densidade energética (Wh/L) [12]:

Quantidade de energia por unidade de volume, também chamado de densidade de energia volumétrica. Assim como a energia específica, possui dependência intrínseca com o processo químico e na forma em que os componentes são acomodados.

2.3.13 Número de ciclos [5]:

Quantas vezes a bateria pode ser descarregada até atingir seu valor ideal de profundidade de descarga e ser recarregada antes que sua capacidade energética chegue ao patamar de 80%. A cada ciclo de descarga e recarga, a bateria perde parte da capacidade de eletrólise de forma progressiva, assim é possível medir a vida útil de uma bateria a partir da média dos ciclos utilizados. Abaixo se encontra a figura 2.6 que demonstra essa característica:



Figura 2.6 - Exemplo de ciclos de uma bateria (baseado em [11]).

2.4 BATERIAS TRACIONARIAS

2.4.1 Chumbo-Ácido

Primeiro tipo de bateria recarregável e capaz de acumular energia, criada através do aperfeiçoamento do experimento de Volta em 1859 por Gaston Platê [14]. Em 1912, modelos em escala comercial da bateria de chumbo-ácido começaram a ser utilizadas para

acionar o sistema de ignição dos automóveis comerciais, substituindo o modelo da época que funcionava através de magnetos [14]. A figura 7 apresenta as soluções químicas encontradas na bateria.

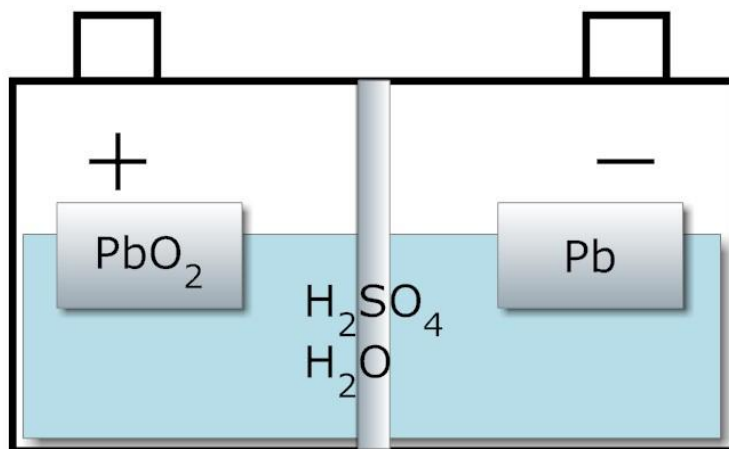
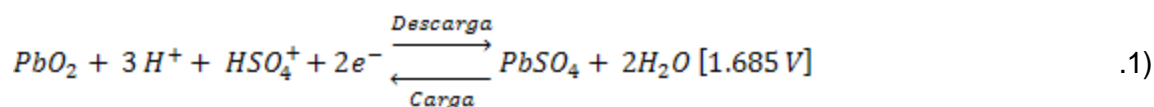


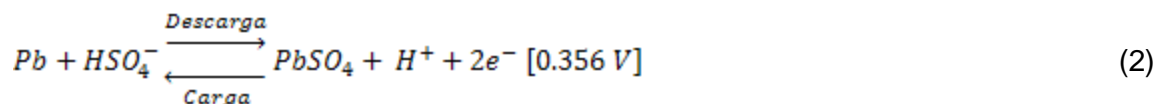
Figura 2.7 - Elementos químicos presentes na reação química das baterias de chumbo-ácido (baseado em [9])

2.4.1.1 Formulação Eletroquímica [5]:

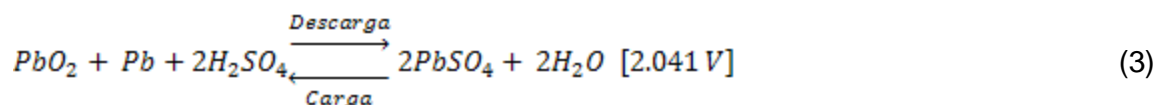
a) Eletrodo Positivo:



b) Eletrodo Negativo:



c) Reação Total da célula



Por ter sido o primeiro tipo de bateria recarregável a ser feita e pela importância dessa bateria na sociedade atualmente, ampla pesquisa foi feita e hoje existem três tipos principais de construções para baterias de chumbo-ácido, a ser:

2.4.1.2 Baterias de chumbo-ácido inundadas [15]:

Tipo mais simples e comum de bateria de chumbo-ácido consiste em um recipiente, normalmente de plástico, onde uma “grade” (grid, como é dito em inglês) de chumbo é mergulhada junto com seu eletrólito em uma base de ácido sulfúrico. Como a grade não possui suporte (somente nas pontas) as baterias inundadas são, mecanicamente falando, as mais fracas.

Como o recipiente não é selado deve-se ter muito cuidado ao manipular a bateria, pois caso entre em contato com o eletrólito diretamente com a mão a pessoa será queimada e caso o eletrólito entre em contato com água reagirá formando gás de cloro, um gás tóxico que irrita o sistema respiratório e pode chegar a ser letal.

2.4.1.3 Baterias de chumbo-ácido em gel [15]:

Utilizando-se de um agente de espessamento para imobilizar o eletrólito, as células em gel permitem o funcionamento da bateria mesmo se a caixa apresentar rachaduras ou for rompida. O agente espessante também impede a estratificação, não permitindo o movimento do eletrólito dessa maneira.

Como esse tipo de célula é selada e, dessa maneira, não pode ser novamente preenchida com eletrólitos, é muito importante controlar a taxa de carga de forma a não danificar a bateria. Uma última consideração importante é que as células em gel usam tensões de carga ligeiramente menores que as células inundadas, de forma que os carregadores padrões (que normalmente são feitos para as baterias inundadas) devem ser ajustados para esse novo valor.

2.4.1.4 Baterias de chumbo-ácido em placas de vidro absorvente (AGM – Absorbed Glass Mat) [15]:

Última tecnologia comercial apresentada no mercado, essas baterias utilizam-se de fibra de vidro como separador no lugar do gel de forma a segurar o eletrólito no seu devido lugar. Além de ser à prova de vazamentos, esse tipo de célula apresenta resistência superior ao impacto e vibrações que os demais tipos de células de chumbo-ácido. Uma grande vantagem desse tipo de célula é que ela utiliza-se dos mesmos valores de tensão de flutuação, de carga, de descarga e nominal das baterias inundadas, sendo assim perfeitas para substituição das mesmas.

Essas baterias, por serem seladas, devem ter um processo cuidadoso de carga, para não arruinar a bateria. Também é importante lembrar que a junção das baterias em gel e as baterias AGM são chamadas de baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA – Valve Regulated Lead Acid Batteries)

2.4.2 Níquel Cádmio

Amplamente utilizadas em uma grande variedade de aplicações até meados da década de 90, as baterias de níquel cádmio foram criadas pelo químico sueco Waldemar Jungner em 1899 [6]. Na época, a única bateria que competia no mercado eram as baterias de chumbo-ácido, que possuíam uma capacidade energética e robustez mecânica menor que as baterias de Níquel-Cádmio de forma que essa nova bateria tomou conta de boa parte do mercado por praticamente um século inteiro [6]. Faz-se necessário ressaltar que comparado

com as baterias atuais do mercado a densidade energética e a energia específica apresenta valores inferiores às demais.

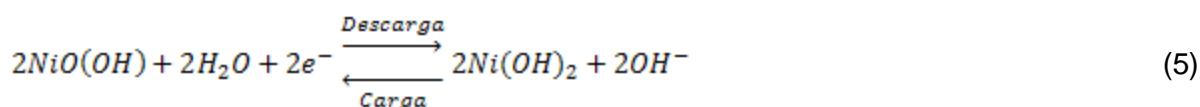
O acumulador possui eletrodos compostos de hidróxido de níquel (Ni(OH)_2) no cátodo e de cádmio (Cd) no ânodo e um eletrólito de uma solução alcalina de hidróxido de potássio (KOH)[5]. As células são lacradas e utilizam um sistema de recombinação que protege a parte de eletrólito e reduz o consumo, aumentando assim seu tempo de vida útil [8]. É importante salientar que o níquel é um metal tóxico e pesado que pode causar alergia, danos à natureza e ao ser humano caso não seja descartado da maneira correta[6].

2.4.2.1 Formulação Eletroquímica[5]:

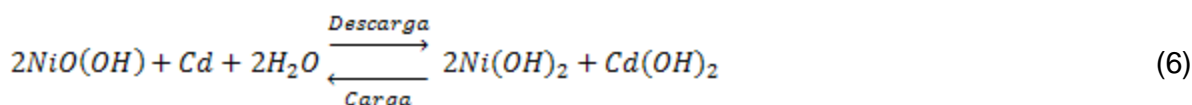
a) Eletrodo Positivo



b) Eletrodo Negativo:



c) Reação total:



Uma das principais desvantagens desse tipo de célula é o chamado efeito memória ou efeito de tensão de depreciação. Quando submetidas a vários ciclos incompletos de descarga e superaquecimento, a tensão da célula sofre um desnível, diminuindo rapidamente o seu valor e chegando a cerca de 1.05 V antes mesmo de atingir os 80% de descarga. Abaixo se apresenta figura que exprime o efeito [8].

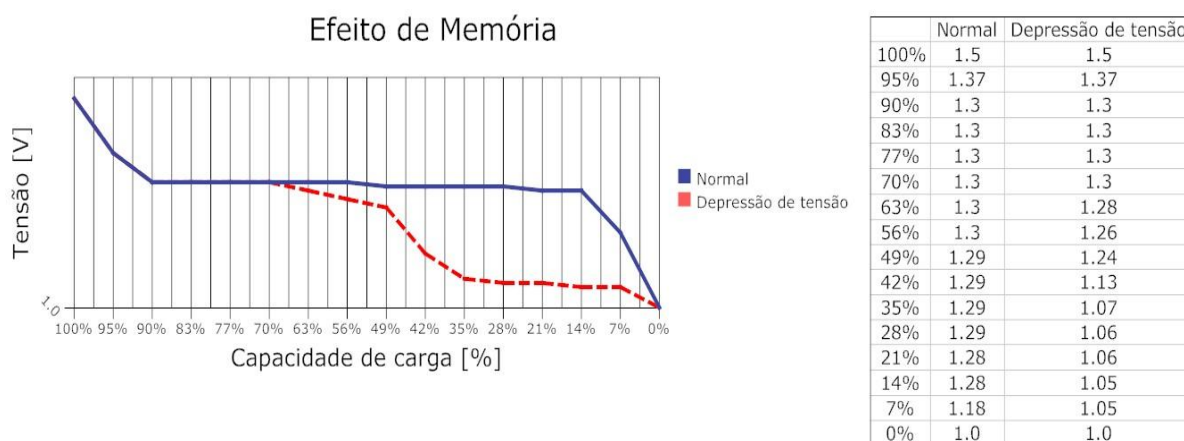


Figura 2.8 - Efeito de memórias nas baterias de níquel-cádmio (baseado em [8])

2.4.3 NiMH - Níquel-Metal Hidreto

O substituto das baterias de níquel-cádmio, as baterias de níquel-metal-hidreto apresentam capacidade energética 40% superior a uma de NiCd similar[16], sendo, esse valor, competitivo no mercado. As pesquisas iniciadas em baterias de Níquel-Hidrogênio, buscando uma forma de como armazenar hidrogênio, acabaram por beneficiar de forma indireta o desenvolvimento desse tipo de acumulador que hoje possui uma farta fatia do mercado [6].

Os primeiros protótipos de NiMH possuíam instabilidade nas ligas de Hidreto metálico, não alcançando o rendimento inicialmente esperado, mas com o amadurecimento nas pesquisas foi possível chegar a um patamar que foi capaz de estabelecer valores superiores de ciclos, densidade energética e energia específica aos das baterias de níquel-cádmio através de melhoramentos constantes. Seus pontos negativos são uma faixa de temperatura de operação menor que as das demais baterias, uma taxa de descarga nominal baixa, auto-descarga muito alta e preocupação com a sustentabilidade ambiental, uma vez que, como foi previamente citado, o níquel é um metal pesado[6].

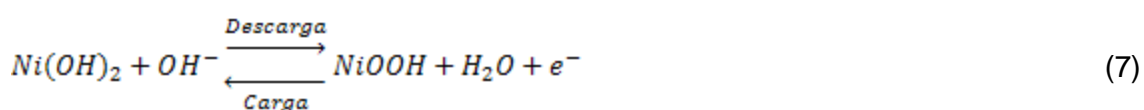
Abaixo é apresentada uma figura com as representações das principais partes desse tipo de bateria.



Figura 2.9 - Principais partes que compõem uma bateria de níquel metal hidreto.

2.4.3.1 Formulação Eletroquímica

a) Eletrodo Positivo:



b) Eletrodo Negativo:



c) Reação total:



2.4.4 Zebra

“Zero emission batteries research activity” (Zebra) são células que possuem em sua composição sal fundido como eletrólito. Os primeiros modelos de baterias a base de sal, ainda dos tipos primários dessa célula, foram produzidos no período da segunda guerra mundial. O padrão de fabricação para os tipos recarregáveis tiveram robusto desenvolvimento a partir da metade da década de 1960 na África do Sul e sua patente foi concedida em 1978 [5].

Como o sal de sódio é encontrado em abundância na natureza e sua composição não traz nenhum prejuízo ao meio-ambiente, essa arquitetura é adequada do ponto de vista sustentável. Outros pontos positivos fortes são o elevado potencial de redução que o sódio é capaz de proporcionar com valor teórico de -2.71 V (na prática esse valor diminui para -2,58 V), baixo custo (pode chegar a ser 15 vezes mais barato que uma bateria similar de chumbo-ácido) e incrível resistência a sobredescargas e sobrecargas [6], [17], [18].

Essa bateria é capaz de operar em três diferentes estados de carga enquanto é descarregada, assim permitindo uma faixa de segurança com a possibilidade de operar tanto a uma tensão maior que 2.58 V por célula (3.05 V), como também de trabalhar a regimes com subtensão de 1.58 V. Considerando a definição que é feita sobre o estado de carga, essa bateria foge aos limites de 0 a 100% das demais baterias devido a essa propriedade de sobrecarga/descarga permitindo mais que 105% de capacidade total [18].

Abaixo figura representando esses estados em um ciclo de descarga.

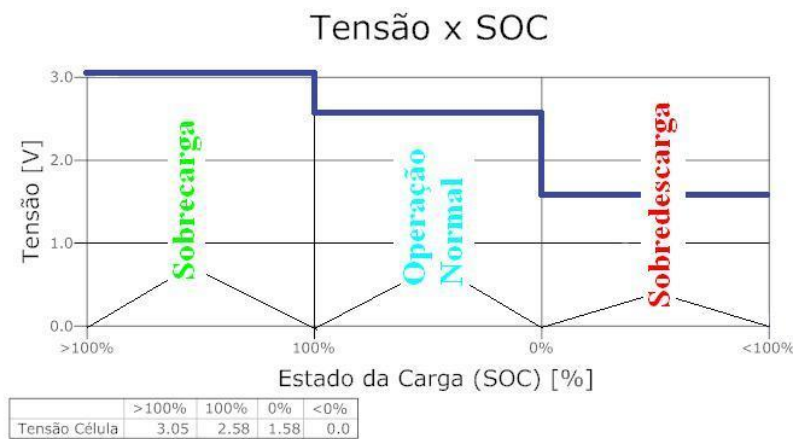


Figura 2.9 - Estados da carga para bateria do tipo ZEBRA (baseado em [18])

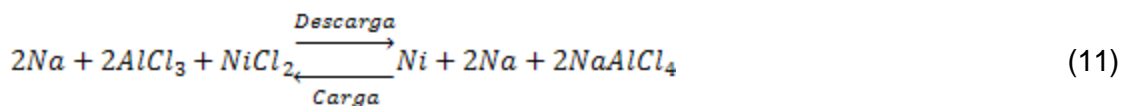
A primeira desvantagem desse tipo de bateria é seu regime de temperatura de operação necessário: entre 270 e 350 °C, o que causa três sérios problemas: questões relacionadas à segurança dos passageiros, no caso de um rompimento do lacre da bateria, com riscos de aquecimento rápido nas partes próximas às baterias, podendo ocasionar sérias queimaduras; tempo necessário para se aquecer as baterias até seu regime de operação - 12 a 24 horas, impossibilitando seu uso em operações esporádicas e não-premeditadas e também causando um gasto médio de 100W de potência para garantir que a temperatura não decaia de seu valor ideal; e quantidade bem limitada de fabricantes desse tipo de bateria, o principal encontra-se na suíça; existe uma possibilidade de modelos muito seleta e uma quantidade de produção de apenas 2000 bancos de baterias por ano[6], [8].

2.4.4.1 Formulação Eletroquímica [18]

a) Operação Normal



b) Sobrecarga



c) Sobredescarga



2.4.5 Li-íon

Essa grande família de baterias baseadas em eletrodos positivos contendo lítio é a mais popular para aplicações portáteis eletrônicos e para os modelos mais atuais de veículos

elétricos[6]. Pesquisas nesse tipo de material renderam um vasto número de diferentes composições possíveis para a confecção de baterias, com valores distintos para densidade energética, energia específica, vantagens e desvantagens do seu uso. Não existe a preocupação com o efeito memória ou a necessidade de uma carga/recarga completa para qualquer uma das tipologias que serão apresentadas. Abaixo se apresentam os quatro tipos principais utilizados em veículos elétricos atualmente, com a ressalva de que foram excluídas químicas que não se encontram em fase comercial e também aquelas que não se aplicam a veículos elétricos [5], [8].

2.4.5.1 LiCoO₂ Íons de Lítio

O mais antigo dos compósitos de Lítio, o óxido de cobalto de lítio é aquele que apresenta a maior energia específica dentre todos os tipos de baterias comerciais existentes. Normalmente, quando um acumulador é referido como sendo de Lítio-Íon e o mesmo não é especificado quanto à sua formulação química, infere-se que este, LiCoO₂, é o tipo de bateria de que se está falando. A empresa SONY foi a pioneira na capacidade de combinar o cátodo de LiCoO₂ com o ânodo feito de carbono, culminando na primeira bateria de íon de lítio fabricada [6].

Dominante no mercado (até mesmo entre os outros tipos de baterias baseadas em lítio), esse tipo de bateria é limitado pela quantidade de cobalto disponível no planeta, tornando-a dispendiosa. A taxa de carga/descarga também é limitada para 1 ou 2C de valor máximo. Algumas fontes científicas já começam a citar que as baterias de Lítio que utilizam esse cátodo estão caindo em desuso, as razões para essa afirmação são[5], [6], [8]:

- Falhas ao atingir temperaturas muito altas. (maior que 70 °C).
- Dano mecânico, causado por quedas, penetração de objetos pontiagudos ou outros abusos.
- Dano elétrico, causado por curto-circuito a partir de uma taxa de descarga acima da capacidade limite ou uma taxa carga acima da capacidade limite. Além da taxa, existe também a limitação de tensão máxima de carga e descarga que deve ser respeitada. Caso a bateria seja carregada/descarregada acima desse valor limite, a reação eletroquímica muda para uma forma irreversível, causando danos permanentes para a bateria.
- Erro interno relacionado a defeitos de produção (eletrodo desalinhado, respingo de solda, contaminação de material solto, dentre muitos outros).

Abaixo encontra-se figura de um notebook que apresentou uma dessas falhas em uma conferência japonesa em 15 de agosto de 2006 (**jornal virtual the inquirer**)e acabou entrando em curto-circuito após super-aquecer, queimando e causando explosões por mais de cinco minutos[19]:



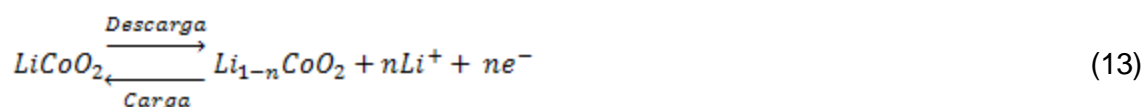
Figura 2.10 (Autorizada Jornal Virtual)

Se o perigo com equipamentos eletrônicos já é grande, maior ainda é a preocupação e cuidado ao se utilizar essas baterias em veículos elétricos, onde a potência fornecida é muito superior a esses equipamentos, uma corrente de curto circuito sendo então muito mais arriscada e danosa.

Apesar da fragilidade de operação desse tipo de bateria foram criados sistemas de controle e segurança avançados para certificar que o ciclo de operação do banco de baterias não saia dos seus limites nominais de operação, graças ao avanço de microcontroladores e sensores eletrônicos, permitindo assim um uso mais seguro e sem risco de explosão/incêndio [6], [8]. Um grande exemplo disso é que uma das marcas de maior destaque dentro de setor de veículos elétricos do mundo, a Tesla, sempre utilizou e utiliza até o presente momento baterias desse tipo e que conseguem produzir automóveis com uma autonomia que compete com os veículos de combustão interna.

2.4.5.1.1 Formulação Eletroquímica[5]:

a) Eletrodo Positivo



b) Eletrodo Negativo



2.4.5.2 Lipo - Polímero de íons de Lítio

Uma das evoluções das baterias de Lítio, o polímero de lítio utiliza-se de uma química aperfeiçoada capaz de proporcionar valores melhores de densidade volumétrica energética

que qualquer outro tipo de bateria baseada em lítio. Baterias de telefone, tablets e uma série de outros aparelhos com restrições de espaço e necessidade de alta capacidade utilizam-se dessa tecnologia [6].

O eletrodo líquido que existia nas células de lítio-íon convencionais são trocadas por um eletrodo sólido ou em gel, permitindo novas maneiras de condicionar as baterias, como por exemplo no formato chamado de "bolsa" que é muito mais compacto do que o comum prismático encontrado nas outras arquiteturas de baterias. A figura 2.12 exemplifica esse novo formato de bolsa [6], [7].



Figura 2.11 - Formato de bolsa da bateria do tipo lítio polímero

Os mesmos perigos encontrados nas baterias de lítio-íon podem também ser encontrados nesse tipo de bateria, os avanços foram feitos somente para aumentar a densidade energética nesse tipo de bateria. Porém, por permitir geometrias anteriormente impossíveis é possível inserir um módulo de proteção e segurança eletrônico em cada uma das células dessas baterias [8].

2.4.5.2.1 Formulação Eletroquímica [20], [21]:

As equações apresentadas por esse tipo de bateria são as mesmas apresentadas pelas baterias de lítio-íon.

2.4.5.3 LiMn_2O_4

Com o intuito de proporcionar correntes maiores de carga/descarga com certo aumento do nível de segurança das baterias, a substituição do eletrodo contendo cobalto por magnésio trouxe grandes benefícios para algumas aplicações específicas. A estrutura química formada é bastante interessante, oferecendo maior facilidade no trânsito de íons no eletrodo. Uma figura representando essa estrutura encontra-se abaixo [7]:

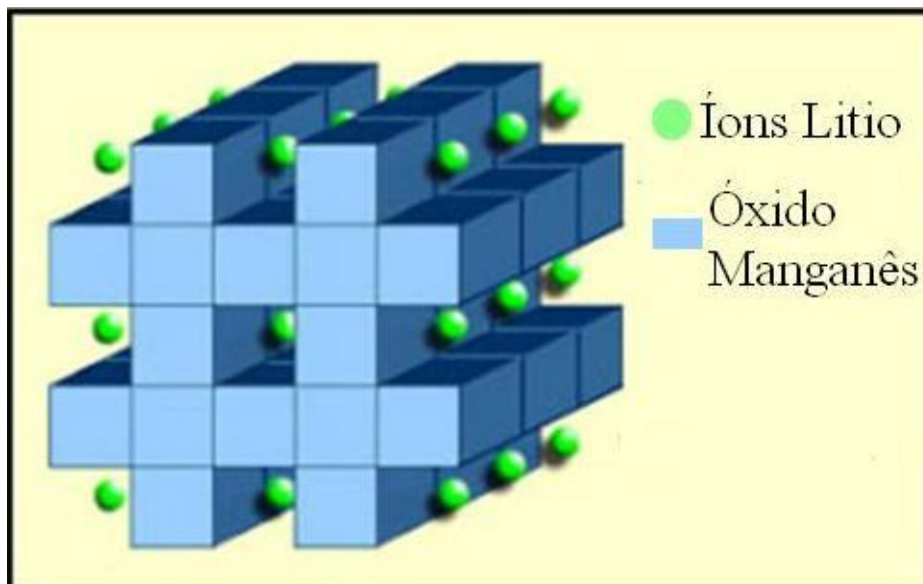


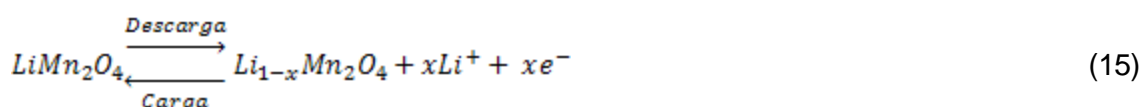
Figura 2.12, Estrutura atômica das baterias de manganês. (Concedido [7]).

As principais desvantagens desse tipo de bateria são o número de ciclos reduzido em comparação com as baterias de eletrodo de cobalto ou uma baixa energia específica ou ainda uma corrente de carga/descarga não muito superior às baterias em comparação, tudo de acordo com o projeto das partes da bateria. Deve-se então escolher em qual dessas três variáveis existe maior desejo de eficiência: quantidade de energia, número de ciclos ou corrente de carga/descarga [6], [7].

Um último aspecto positivo a ser considerado é que a mudança para magnésio também aumenta o ponto de fusão da combinação Li-Mn em comparação com Li-Co, e somando isso ao fato de a resistência interna dessas baterias ser muito pequeno, falhas na operação ocasionadas por temperatura de operação muito alta são mais incomuns nessa topologia[6].

2.4.5.3.1 Formulação Eletroquímica [7]:

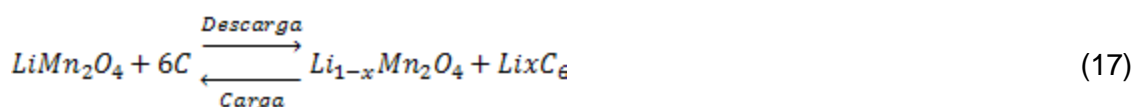
a) Eletrodo Positivo



b) Eletrodo Negativo



c) Reação Total



2.4.5.4 LiFePO_4 - Fosfato Ferroso de Lítio

Na busca por baterias mais duráveis e com um nível superior de proteção a curtos-circuitos pesquisas e testes promissores foram feitos utilizando-se óxido de ferro para se ligar ao lítio e conseguiu-se com sucesso chegar a uma nova fórmula de baterias que são capazes de proporcionar uma boa quantidade de energia e ao mesmo tempo suavizar ou até mesmo desaparecer com os principais obstáculos no uso de baterias de lítio. Podendo durar facilmente mais de 5 anos, desde que sejam respeitados os limites de 80% de descarga, as baterias de fosfato ferroso de lítio possuem dentre todas as arquiteturas de lítio a maior segurança entre elas, obtendo níveis de estabilidade termal e química superiores em relação aos demais e também suporta temperaturas altas sem se decompor[22].

O preço de todas essas melhorias nesse tipo de bateria é a diminuição da densidade e energia específica da bateria, podendo essa perda chegar a até 25% em comparação com as outras químicas de lítio [7]. Seu funcionamento em baixas temperaturas é muito prejudicado, reduzindo o desempenho das baterias e sua auto-descarga é alta o suficiente para desbalancear a carga contida em um banco de baterias com o tempo, trazendo a necessidade de um sistema de controle capaz de rebalancear esse tipo de bateria a cada recarga feita. Uma última observação a ser feita é que apesar de suportar temperaturas de operação altas sem perdas de eficiência, o número de ciclos diminui consideravelmente quando as baterias são utilizadas em um regime de operação com temperaturas muito altas, sendo o uso em tais condições desaconselhável [7].

Abaixo se encontra a figura 2.14, um gráfico de uma bateria de LiFePO_4 demonstrando sua capacidade com o aumento de ciclos com uma descarga de 80% por ciclo:

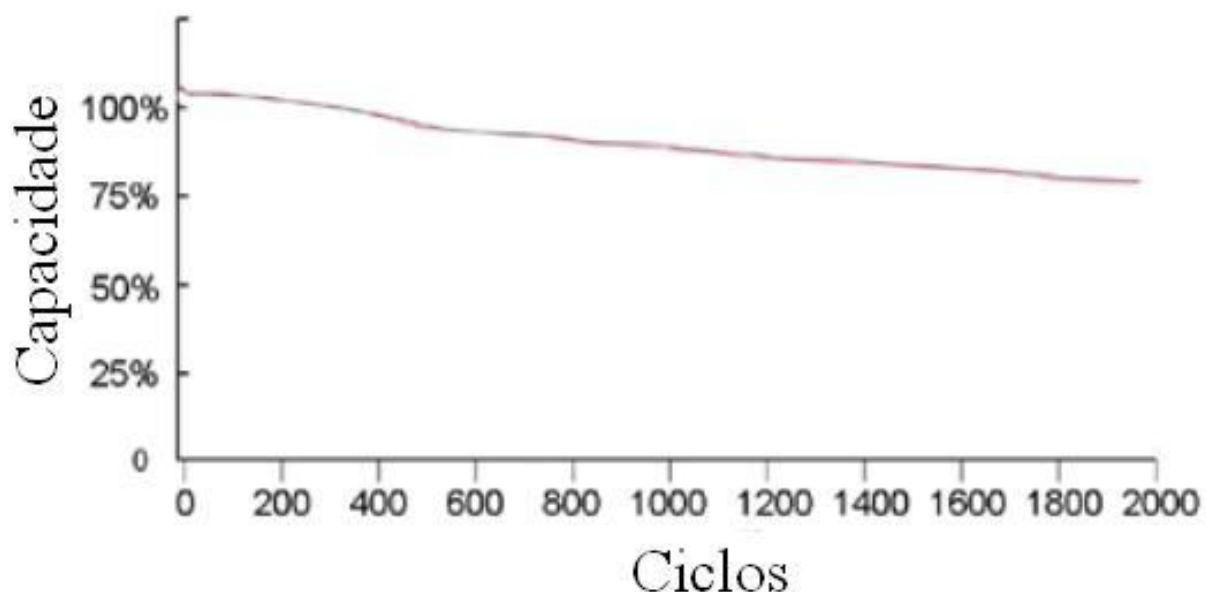
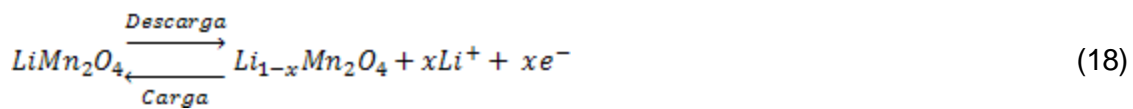


Figura 2.13 - Diminuição da capacidade de uma bateria com a passagem dos ciclos (baseado em [11])

2.4.5.4.1 Formulação Eletroquímica [5]:

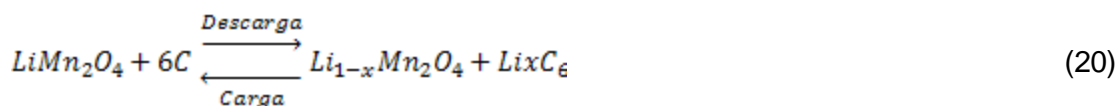
a) Eletrodo Positivo



b) Eletrodo Negativo



c) Reação Total



2.4.6 Zinco-Ar

Diferente de todas as outras baterias até aqui apresentadas, esse tipo de bateria primária (aquelas que não podem ser recarregadas) conseguiu uma forma de ser utilizada na dinâmica veicular elétrica. Diferentemente de qualquer outra bateria aqui explicada, as baterias de zinco-ar são energizadas através da absorção do oxigênio do próprio ar e a sua introdução na célula, o que somada ao preço e disponibilidade do zinco em nossa atmosfera torna o custo desse tipo de bateria muito pequeno. Possui uma das maiores energias específicas em comparação com outras baterias primárias [6], [23].

A "recarga" desse tipo de baterias é feita de forma mecânica, através de um aparelho que seja capaz de retirar os cartuchos de zinco já utilizado e os repõem com cartuchos novos, permitindo assim um novo uso das baterias [23]. E permitindo a reciclagem dos cartuchos utilizados. A figura 2.15 mostra as principais partes que operam sobre esse tipo de bateria.

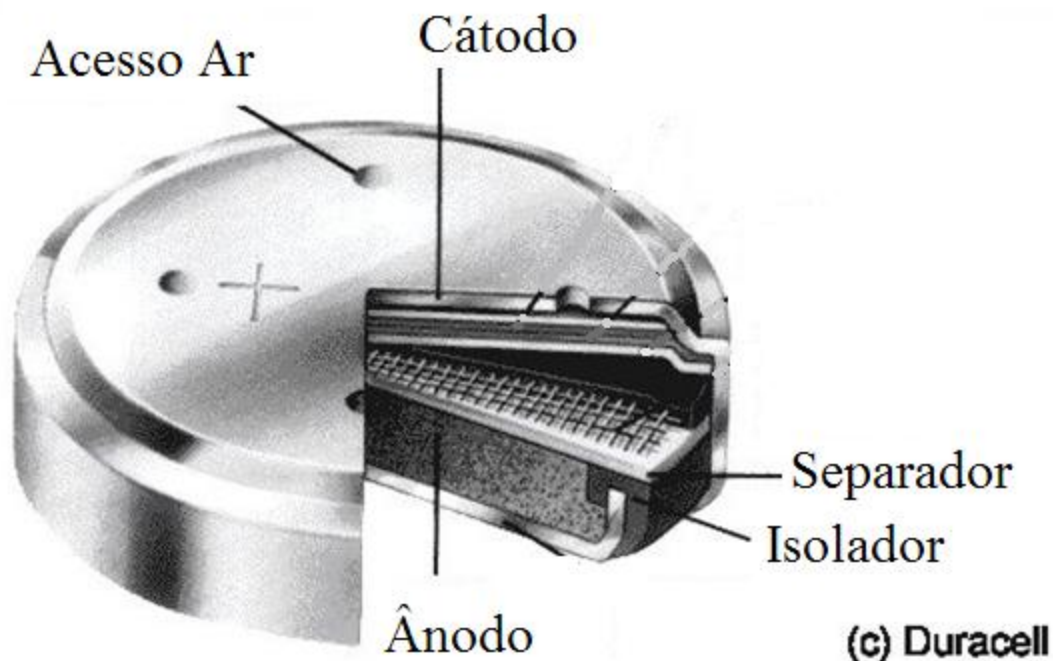


Figura 2.14 - Principais componentes bateria zinco-ar

É importante citar que a recarga mecânica, apesar de muito interessante pode ser inconveniente, pela necessidade de sempre estar se trocando o zinco dentro da célula. Outros problemas ocasionados por essa estrutura são a fragilidade de operação a altas temperaturas e umidade, que diminuem a eficiência de descarga e também uma auto-descarga muito grande para uma bateria primária, o que pode acarretar em necessidades de trocas de cartucho de zinco antes do tempo previsto. Por fim, apesar do processo mecânico de trocar ser eficiente, esse só pode ser repetido de 50 a até 400 vezes por bateria, tornando o número de ciclos que a mesma possui muito curto [5],[anexo I] .

2.4.6.1 Formulação Eletroquímica [5] :

a) Eletrodo Positivo



b) Eletrodo Negativo



c) Reação Total



Condensadas nas tabelas à seguir, estão duas tabelas com todas as informações pertinentes a cada tipo de bateria, e uma série de tabelas cada uma contendo as vantagens e desvantagens de um dos modelos de baterias apresentados no capítulo.

Tabela 2.1 - baterias (baseado em [4, 5, 6, 7, 10, 14, 16, 17, 19, 20,21])

Informações/ Baterias	VRLA	Níquel-Cadmio	Níquel Metal Hidreto	Zebra	Zinco Ar
Tensão Nominal por célula	2.0V (12V)	1.2V	1.2V	2.58V	1.15 V
Tensão de circuito aberto	12.6V	1.5V	1.5V	3.05V	1.2V
Tensão de corte	10.5V	1V	1V	1.58V	0.85V
Tensão de Flutuação	14.4V	1.6V	1.6V	3.5V	1.25V
Profundidade de descarga	20-60%	80-100%	80%	100%	80%
Taxa de carga	0.1C	0.1C	0.1C	2C	1/3 C
Taxa de carga máxima	0.5C	2C	0.5C	5C	1C
Taxa de descarga	0.05C ou 0.2 ¹	1C	0.5C	3C	1/5C
Taxa de descarga máxima	15C	20C	5C	10C	3C
Energia específica	30-50 Wh/kg	35-80 Wh/kg	60-120 Wh/kg	60-120 Wh/Kg	200 Wh/Kg
Densidade Energética	60-75 Wh/L	100-150 Wh/L	200-350 Wh/L	200-350 Wh/L	220 Wh/L (tipico)
Número de ciclos	200-800	500-1500	300-2500	1000-2500	50-400
Auto descarga mensal	3-4%	20%	30%	0%	10 - 20%
Temperatura de funcionamento carga	0 a 49°C	-20 a 45°C	0 a 30°C	0 a 350°C	0 a 45°C

Obs 1: Todas as informações técnicas sobre baterias de chumbo ácido sempre apresentam dois valores distintos para descarga: O primeiro sendo a descarga em 20 horas (ou 0.05 C) e o segundo em 5 horas (ou 0.2 C), apresentando assim não somente 1 mas dois valores nominais diferentes. Além disso, apesar da célula possuir 2.0V, sua venda ocorre somente para conjuntos de 12.0V, valor utilizado para declaração das outras tensões apresentadas.

Tabela 2.2 - Especificações baterias (baseado em [4, 5, 6, 7, 10, 14, 16, 17, 19, 20,21])

Informações / Baterias	Lítio ion	Polímero de Lítio	Lítio Manganês	Fosfato Ferroso de Lítio
Tensão Nominal por célula	3.7V	3.7V	3.6 - 3.8 V	3.2 V
Tensão Nominal por conjunto	-		-	-
Tensão de circuito aberto	4.15V	4.15V	4.15V	3.85V
Tensão de corte	2.5V	2.5V	2.5V	2.5V
Tensão de Flutuação	4.2V	4.2V	4.2V	3.4V
Profundidade de descarga	80%	80%	80%	80%
Taxa de carga	0.5C	0.5C	1C	1C
Taxa de carga máxima	1C	1C	1C	3C
Taxa de descarga	1C	1C	4C	3C
Taxa de descarga máxima	40C	40C	60C	10C
Energia específica	90-210 Wh/Kg	120-210Wh/Kg	100-150 Wh/Kg	90-120 Wh/Kg
Densidade Energética	220-350 Wh/L	230-410 Wh/L	220-270 Wh/L	110 Wh/L (típico)
Número de ciclos	500-1200	1000-1500	1000-1200	2000-3000
Auto descarga mensal	5-10%	5-20%	5 - 10%	5-15%
Temperatura de funcionamento carga	0 a 45°C	0 a 45°C	0 a 50°C	0 a 45°C
Temperatura de funcionamento descarga	-20 a 60°C	0 a 60°C	-20 a 80°C	-20 a 60 °C
Resistência interna	75-250 mohm	200-300 mohm	10-100 mohm	1.5 mohm

Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens da bateria de chumbo-ácido

Vantagens	Desvantagens
Preço	Densidade energética
Variedade de produtos	Energia específica
	Tóxico
	Eficiência
	Nº de ciclos

Tabela 2.4 - Vantagens e Desvantagens da bateria de níquel-cádmio

Vantagens	Desvantagens
Preço	Densidade energética
Variedade de produtos	Energia específica
	Sustentabilidade (metal tóxico)
	Efeito de memória
	Eficiência

Tabela 2.5 - Vantagens e Desvantagens da bateria de níquel metal hidreto

Vantagens	Desvantagens
Energia específica	Preço
Eficiência	Sustentabilidade (metal tóxico)
Densidade energética	Temperatura de operação
	Auto-Descarga mensal

Tabela 2.6 - Vantagens e Desvantagens da bateria Zebra

Vantagens	Desvantagens
Nº de ciclos	Temperatura de operação alta
Sustentabilidade	Demora para aquecer a bateria até seu estado operacional
Resistência a sobrecarga e sobredescarga	Baixa produção anual

Tabela 2.7 - Vantagens e Desvantagens da bateria de Lítio-Íon

Vantagens	Desvantagens
Densidade energética	Preço
Energia específica	Sustentabilidade
Variedade de produtos	Baixa resistência a curto-circuito

Tabela 2.8 - Vantagens e Desvantagens da bateria de polímero de lítio

Vantagens	Desvantagens
Densidade energética	Preço
Energia específica	Baixa resistência a curto-circuito
Formatos compactos	Baixa resistência a temperaturas altas

Tabela 2.9 - Vantagens e Desvantagens da bateria de lítio manganês

Vantagens	Desvantagens
Densidade energética	Preço
Energia específica	Nº de ciclos
Segurança	

Tabela 2.10 - Vantagens e Desvantagens da bateria de fosfato ferroso de lítio

Vantagens	Desvantagens
Densidade energética	Preço
Energia específica	Baixo rendimento em temperaturas baixas
Nº de ciclos	Auto-descarga
Eficiência	

Tabela 2.11 - Vantagens e Desvantagens da bateria de zinco-ar

Vantagens	Desvantagens
Preço	Recarga mecânica
Sustentabilidade (reciclagem)	Auto-descarga
Energia específica	Fragilidade de operação em altas temperaturas e alta umidade
Densidade energética	Nº de ciclos

CAPÍTULO 3 - MOTORES ELÉTRICOS

Após a invenção da bateria e a descoberta do campo magnético pode-se dizer que o terreno para a criação de máquinas elétricas estava pronto. Em 1831 Michael Faraday e Joseph Henry criaram o primeiro motor experimental, o qual era munido de imã permanente que através da corrente conduzida pela pilha de Volta, era capaz de criar energia girante em um corpo [24]. A pilha de Volta criava uma corrente em um recipiente contendo mercúrio, que por sua vez produzia um campo magnético através do fio de metal que era suspenso no mercúrio (fio este que podia mover-se livremente através da superfície do líquido). Por fim um campo eletromagnético era criado no fio, e esse campo interagiu com o campo do imã permanente, tendo como resultado final a rotação do fio. Em 1838 Moritz Jacobi desenvolveu um motor forte o suficiente para impulsionar um barco com 14 pessoas através de um amplo rio. Desde então foram criados novos modelos que objetivaram melhorias em: potência máxima adquirida, torque, eficiência, praticidade dentre várias outras soluções demandadas pelo mercado [6].

Os motores elétricos tornaram-se populares desde do início do século XX, seu uso estende-se a uma vasta gama de produtos encontrados hoje no mercado, como por exemplo: ventiladores, portões automáticos, brinquedos, escovas elétricas, liquidificadores, máquinas industriais, elevadores e muitos outros. Seu uso, porém, no setor automobilístico ficou durante muito tempo limitado, principalmente pelo sério problema de autonomia proporcionado pelos tipos de baterias existentes da época (em sua maioria de chumbo-ácido), sendo encontrado somente em carrinhos de golfe e empilhadeiras industriais, usados em locais fechados e por não emitirem qualquer tipo de fumaça. Com a descoberta das baterias baseadas em níquel e lítio essa realidade mudou e hoje há vários modelos diferentes de motores no mercado [6].

Na dinâmica atual dos veículos elétricos todos os motores utilizados são dos tipos magnéticos (existem também os tipos de motores eletroestáticos e piezoelétricos, porém não são utilizados em veículos elétricos), que são classificados em três categorias, com cinco topologias distintas de motores utilizados na indústria de veículos elétricos, que são [25], [26], [27]:

- Motor de corrente contínua com rotor bobinado (*DC Wound Motors*).
- Motor síncrono de corrente alternada, escovado e excitado por corrente contínua (*SBM Motor*).
- Motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua (*SPM Motor*).
- Motor de corrente alternada de indução (*Induction Motor*).

- Motor de corrente alternada de relutância (Reluctance Motor).

3.1 Motor de corrente contínua com rotor bobinado

É o tipo de motor mais tradicional do mercado, pode ser dividido em quatro componentes: rotor, estator, comutador e escovas. Cada uma dessas estruturas é explicada abaixo:

a) Rotor

Também chamado de armadura, é feita de um ou mais enrolamentos que, ao serem energizados, produzem um campo magnético, criando o chamada fluxo de armadura, que cumpre a função de distorcer o campo do estator e dessa forma deslocar o plano neutro, permitindo assim o movimento do eixo de rotação. Enquanto o eixo gira, os enrolamentos são energizados de forma alternada pelos comutadores, trocando suas polaridades de campo e assim permitindo a continuidade do movimento do eixo [28].

b) Estator

Diferentemente do rotor, o campo magnético criado no estator é estacionário e encontra-se ao redor do rotor, criado também através de envolvimentos eletromagnéticos. Os mesmos são chamados de enrolamentos de campo e ele pode ser fabricado tanto em cobre quanto em alumínio, apesar do cobre apresentar melhor eficiência quanto à perda de carga produzida pelo material [28].

c) Comutador

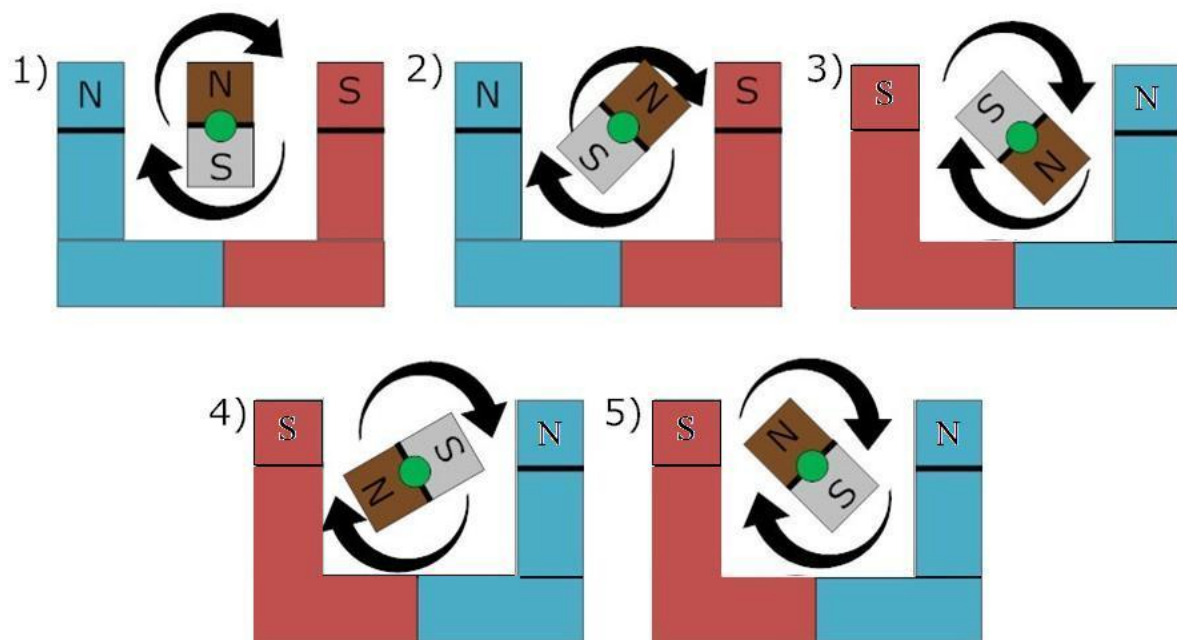
É um interruptor elétrico rotativo que consiste basicamente em um conjunto de barras de contato de cobre, fixadas no eixo do motor e conectado aos enrolamentos da armadura através das escovas. Enquanto o motor gira, as escovas tocam em segmentos diferentes do comutador. Esses segmentos são ligados em locais únicos do enrolamento do rotor, criando dessa forma um campo magnético dinâmico que varia de acordo com o giro do eixo [28].

d) Escovas

Antigamente o material mais utilizado para as escovas era o cobre, porém costumava-se observar arranhados e sulcos nos segmentos do comutador, que deveriam ser lisos. Com o passar dos anos, novos formatos de escova foram desenvolvidos, com a adição de carbono como material viável para a fabricação das escovas [31]. No mercado atual existe um híbrido entre carbono e cobre; uma liga de ambos em que possuem maior quantidade de cobre caso a aplicação necessite de alta corrente e baixa tensão, enquanto as ligas ricas em carbono produzem melhores resultados em aplicações que exijam alta tensão e baixa

corrente. Uma desvantagem criada pelo uso dessas escovas é o desgaste do material, depositando o pó criado pela fricção entre os segmentos do comutador e diminuindo a eficiência do sistema [27].

A operação desse motor exige duas alimentações: uma para os enrolamentos do estator e outra para os enrolamentos do rotor. A primeira alimentação cria o campo magnético necessário para girar o motor e a segunda gera a força motriz. A principal diferença desse tipo de motor para os outros aqui estudados é que ele não necessita de um controlador para inverter a corrente nos enrolamentos do motor, esse trabalho é feito mecanicamente através do comutador. A figura 3.1 mostra o funcionamento simplificado desse tipo de motor [6].



Legenda:

- N Pólo norte do estator
- S Pólo sul do estator
- N Pólo norte da armadura
- S Pólo sul da armadura
- Eixo

Ordem de eventos:

1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 1 - 2...

Figura 3.1 - Comportamento dos principais componentes de um motor de corrente contínua

Precisão e robustez no controle de velocidade, simplicidade de implementação, tecnologia já tradicional do mercado e custo baixo são as principais vantagens desse tipo de arquitetura. Já suas desvantagens baseiam-se na necessidade de manutenção das escovas, na baixa eficiência do sistema (sempre menor que 90%)[28] e na baixa densidade de potência. Existem quatro tipos principais de ligações para esses motores: ligação SHUNT, ligação em série, ligação composta e ímã permanente. Dentre todas essas topologias, os motores de corrente contínua (DC) de ímã permanente, apesar de serem os mais utilizados dos quatro tipos de motor de corrente contínua, não são utilizados em aplicações que envolvam veículos elétricos por possuírem um rendimento inferior aos demais tipos de motor, sendo então desnecessário aprofundar-se nessa forma de ligação para o motor. É importante resaltar que os motores impulsionados por ímãs permanentes possuem os mesmos componentes que os demais motores e as mesmas formas de controle de velocidade e transmissão utilizadas quando necessário [27].

3.1.1 Ligação SHUNT

A ligação entre os enrolamentos de campo e a armadura é feita em paralelo, de forma que a corrente que passa no rotor é independente da corrente introduzida no estator, mas eles ainda possuem uma fonte de tensão contínua em comum. Possui excelente regulação de velocidade (exatamente por possuir correntes únicas e independentes no rotor e estator) e a perda de magnetismo não é um problema sério para essa ligação. Seu torque de saída, que é obtido quando o motor consegue desenvolver a partir do repouso, é menor do que aquele obtido pelos motores em ligação em série. A forma de ligação para esse topologia é apresentada na figura 3.2 [28].

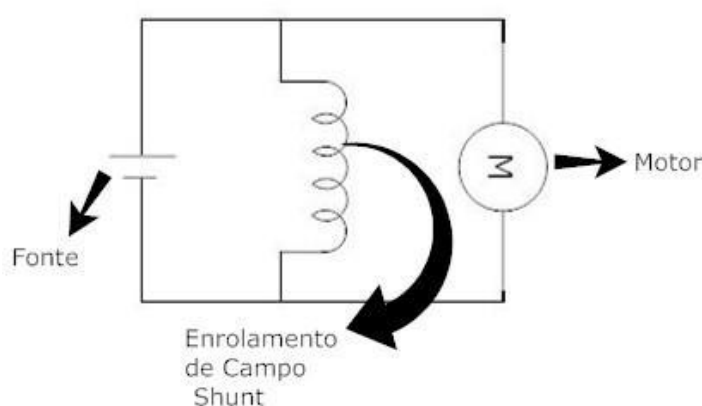


Figura 3.2 - Exemplo de ligação do tipo SHUNT

3.1.2 Ligação em série

Ao invés da ligação em paralelo dos enrolamentos de campo e da armadura, essa ligação é feita em série, ou seja, a corrente do sistema é a mesma para ambos componentes. A primeira dificuldade criada por esse tipo de ligação é que a velocidade varia de forma não linear com o torque aplicado na carga e com a corrente de armadura, dificultando o controle

de velocidade. Outra desvantagem ocorre quando há pouca ou nenhuma carga aplicada ao motor; a baixa corrente que pelo sistema faz com que o campo eletromagnético produzido pelo estator seja muito pequeno, obrigando o rotor a girar mais rápido para criar o campo eletromagnético necessário. Esse tipo de comportamento pode danificar o motor por exceder a velocidade limite a qual a armadura foi fabricada para girar. Essa topologia, porém, permite alto torque de partida e é ideal para aplicações com cargas inerciais grandes. A figura 3.3 apresenta a forma de ligação para esse tipo de motor [28].

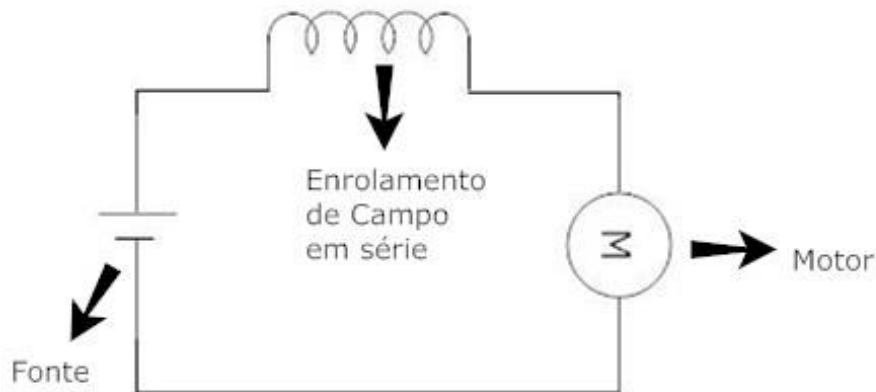


Figura 3.3 - Exemplo de ligação do tipo Série

Existe ainda uma terceira forma de ligação, chamada de ligação composta, na qual existe tanto o enrolamento de campo em série como o enrolamento de campo Shunt, dessa forma é possível aproveitar os benefícios de alto torque de saída dos motores ligados em shunt e ainda obtendo um controle de velocidade melhor que nos motores ligados em série [6].

3.1.3 Controladores

Apesar de não existir necessidade de implementação de controle de velocidade para motores de corrente contínua cujos rotores são bobinados, eles são fabricados com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema, pois permitem o controle direto da corrente de entrada tanto no rotor como estator e também em alguns casos para permitir o movimento nas duas direções, fator importante na dinâmica veicular, tendo em vista que o veículo deve tanto ser capaz de andar para frente como também deve cumprir a função de marcha ré. Pode-se dividir o projeto eletrônico principal dos controladores para esse tipo de motor em dois ramos principais: controle de transmissão e controle de velocidade [26],[27].

3.1.3.1 Controle de transmissão

A forma como um motor opera para movimentar um veículo pode ser resumida em estudar as suas constantes de torque e velocidade e as interações entre as mesmas. O diagrama da figura 3.4 resume as quatro situações possíveis de se combinar essas variáveis e os efeitos por elas criados.

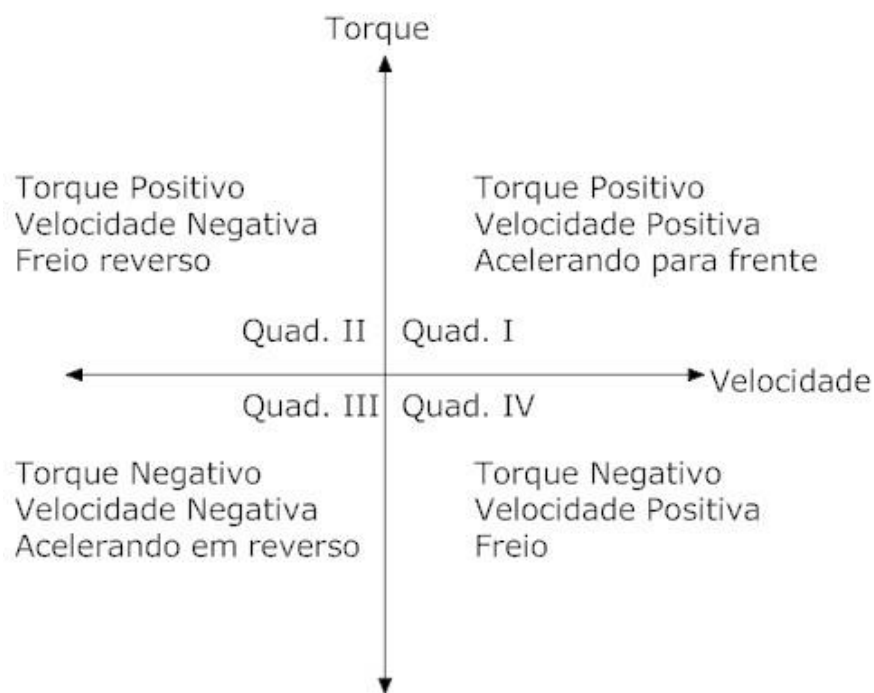


Figura 3.4 - Quadrantes de operação

Um motor que funciona somente em uma direção utiliza somente um dos quadrantes, o de número I (torque e velocidade positivos) e o seu circuito é o mais simples de todos, bastando utilizar-se de um único transistor e dois diodos que possuem como função impedir sobrecarga no sistema, mantendo certo grau de segurança. Abaixo, na figura 3.5, um exemplo desse tipo de aplicação [32]:

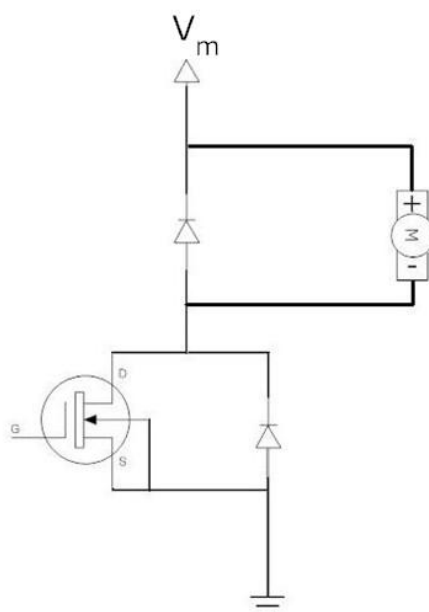


Figura 3.5 - Diagrama de controle para motor que funciona em somente uma direção

Uma topologia mais robusta, mas que ainda só é utilizada em motores que devem acionar uma única direção, com proteção de picos de corrente e um pull-down para desligar o transistor é apresentada na figura 3.6 [28]:

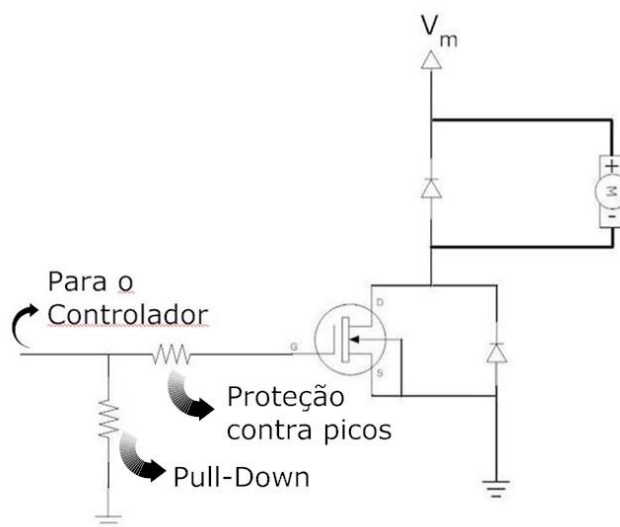


Figura 3.6: Diagrama de controle para uma direção com proteção.

Para que o veículo possua velocidade para frente e para trás é necessário um controlador que atua nos quadrantes I e III (torque e velocidade positivos ou torque e velocidades negativos) e o circuito criado para permitir essa aplicação é chamada de ponte H, que consiste no uso de quatro transistores em conjunto de dois sinais de controle (avanço e reverso). O circuito básico de funcionamento de uma ponte H é apresentado a seguir na figura 3.7 [32]¹

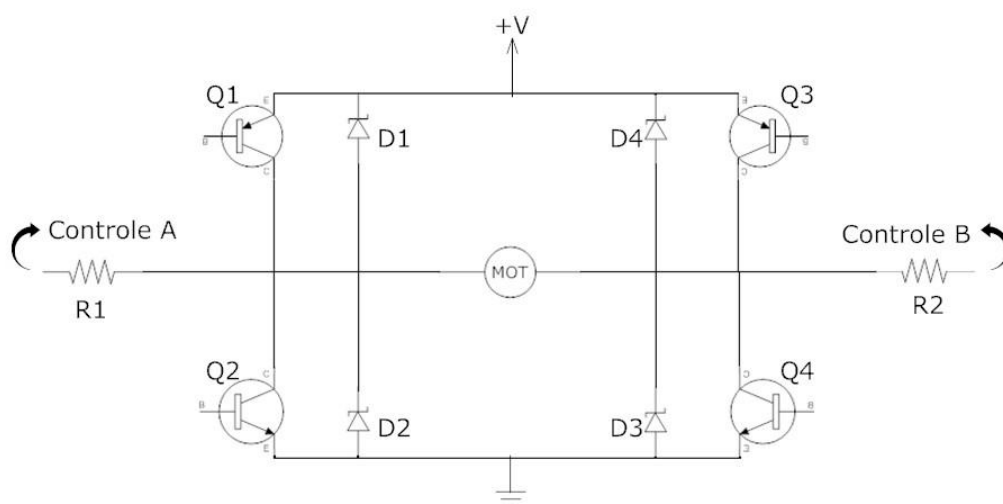


Figura 3.7 - Controle possibilitando quadrantes "I" e "III".

¹

De acordo com a figura 3.7, podemos acelerar o motor em uma das direções (por exemplo, impulsionar um veículo para frente) mantendo o valor "Controle A" em 1 o valor de "Controle B" em 0. Para acionarmos a direção contrária (veículo com o movimento negativo ou dando ré) é necessário utilizar os valores inversos para os sinais de controle, 0 para o "A" e 1 para o "B". É importante salientar que nesse tipo de configuração nunca se deve acionar o controle A e B ao mesmo tempo, causando um curto-circuito entre os transistores e podendo danificar permanentemente o circuito. A última das opções remanescente é quando nem o controle A nem o controle B estão em funcionamento, nesse caso o motor simplesmente não gira para nenhum dos lados e continua desligado.

Por fim, para que seja possível utilizar a frenagem regenerativa (velocidade positiva e torque negativo) é necessário a ativação de um terceiro quadrante e a introdução de dois sinais de controle extras. O circuito final fica como representado na figura 3.8 [33]:

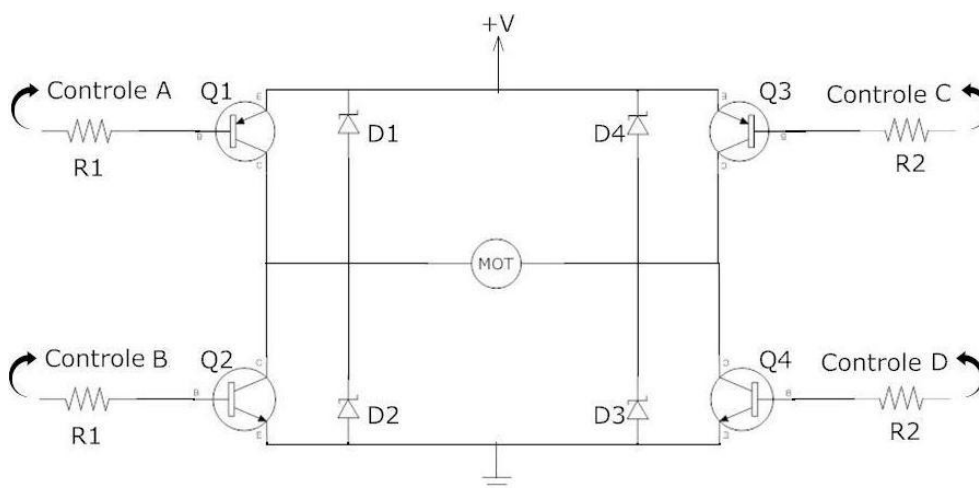


Figura 3.8 - Diagrama de controle completo

A tabela-verdade para o modo de operação de acordo com o valor de cada sinal de controle é apresenta na tabela 3.1 [33]:

Tabela 3.1 - Tabela-verdade para controle completo

Ação Controle /	Controle A	Controle B	Controle C	Controle D
Acelerar	1	0	0	1
Ré	0	1	1	0
Freio	0	1	0	1
Freio Reverso	1	0	1	0
Desligado	0	0	0	0
Sem função	0	0	0	1
Sem função	0	0	1	0
Sem função	0	1	0	0
Sem função	1	0	0	0
Não utilizar	1	1	*	*
Não utilizar	*	*	1	1

Existem topologias muito mais avançadas de controle de transmissão para motores DC, porém todos utilizam-se dos mesmos princípios básicos acima apresentados.

3.1.3.2 Controle de velocidade

A velocidade angular do motor é diretamente proporcional ao valor da tensão aplicada no sistema. Essa afirmação é verdadeira devido à curva torque versus velocidade de rotação, grandezas inversamente proporcionais de forma linear, conforme gráfico apresentado na figura 3.9[32]:

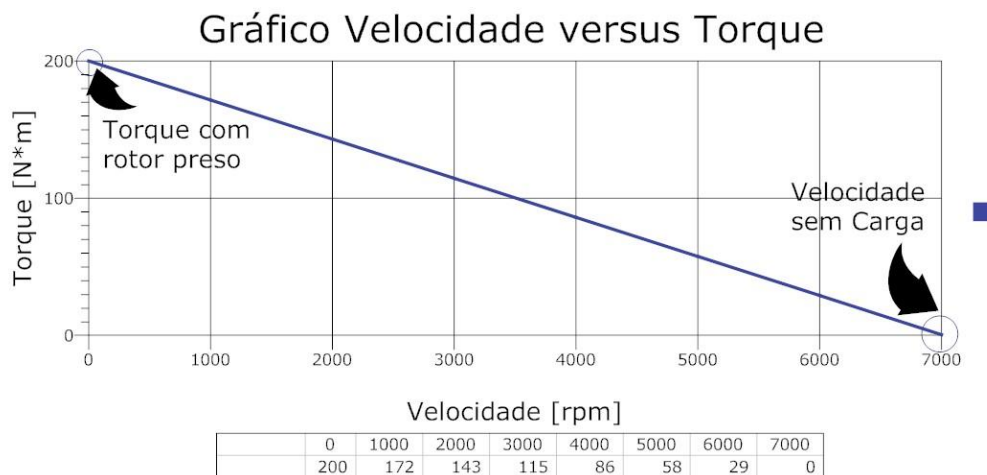


Figura 3.9 - Gráfico velocidade versus torque para controle da velocidade.

Outra linha de raciocínio importante de se salientar é a de que a tensão utilizada no sistema é diretamente proporcional à velocidade de rotação do motor. Dessa forma, uma aplicação simples para se controlar a velocidade a ser requisitada do equipamento é variar a tensão do sistema de acordo com o valor de rotação desejado. Um método eficaz e que exija poucos recursos eletrônicos é o controle por largura de pulso, também chamado de PWM ("Pulse-Width Modulation")[33]. Resumidamente, esse dispositivo envia pulsos que possuem somente dois valores possíveis, (1 para "ligado" e 0 para "desligado") e de acordo com o valor médio adquirido segundo as fórmulas à seguir[28]:

$$M = \frac{ON}{ON+OFF} \quad (24)$$

$$V_{média} = M * V_{total} \quad (25)$$

Legenda:

M = Razão do ciclo de trabalho

ON = Período em que a tensão estava ativa

OFF= Período em que a tensão estava inativa

Vmédia = Tensão média, que é a tensão enviada ao motor

V_{total} = Tensão total que o sistema suporta

Utilizando essas equações é possível definir o regime de trabalho que se queira produzir no motor, controlando com segurança a velocidade que deve ser aplicada no mesmo. Um exemplo de funcionamento do PWM com um valor M de 0.75, ou seja, uma $V_{média}$ de 75% da V_{total} , culminando em também 75% da velocidade final atingível pelo motor [33]. Na figura 3.10 temos a representação desse exemplo.

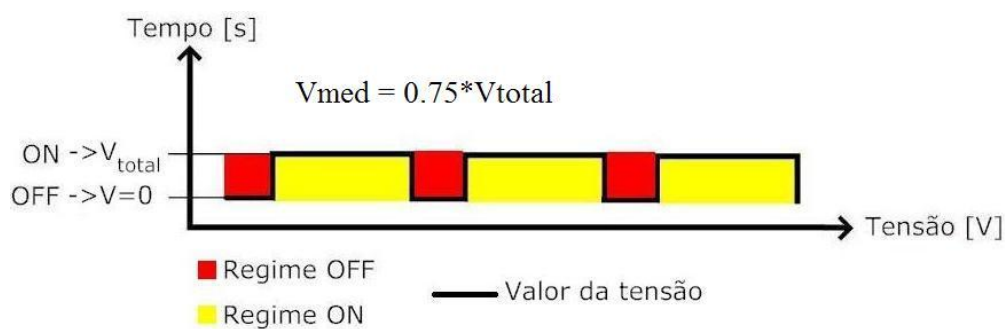


Figura 3.10 - Gráfico de funcionamento de PWM

3.2 Motores de Corrente Alternada

A sua forma de alimentação para os motores de corrente contínua é diferente daqueles que se utilizam de corrente alternada. A fonte de corrente alternada possui um ou mais polos, que trazem energia ao sistema em ondas sinodais, variando a tensão do sistema entre a tensão de pico (V_{+}), descendo para 0 V e depois indo para a tensão de pico negativa (V_{-}), voltando então para o 0 V e subindo novamente para a tensão de pico (V_{+}) e assim sucessivamente. O uso de três ou mais fases ao mesmo tempo traz maior equilíbrio para a corrente que irá ser fornecida à carga e por isso é mais comum encontrar-se no mercado motor de corrente alternada com três polos, que são os mais simples de se fabricar e já possuem uma resposta sólida em termos de balanceio de corrente para a carga [25].

3.2.1 Motor síncrono de corrente alternada, escovado e excitado por corrente contínua (SBM Motor).

A forma mais simples de se imaginar como estão distribuídas as partes de motor síncrono com escovas é pensando no motor de corrente direta com escovas e então invertendo de dentro para fora as partes do rotor e estator, ou seja, a armadura passa a estar no estator e a corrente de campo passa a ser encontrada no rotor. Como não existe comutador nos motores síncronos e os rotores são feitos de uma mistura de aço com ímãs permanentes, não é necessário o uso de bobinas no estator para gerar o campo magnético [25]. Essa mudança, que aumenta o espaço livre no estator, permite o uso de um sistema de melhor arrefecimento do motor, bem como a possibilidade de se trabalhar em tensões de operação maiores.

A dinâmica de funcionamento desse motor caracteriza-se da seguinte forma [25]:

- Anéis coletores fornecem energia através de uma fonte estacionária para as escovas de carvão.
- A corrente elétrica fornecida flui pelas escovas de carvão para as bobinas do rotor.
- O campo do estator magnetiza o rotor, induzindo os polos magnéticos para o sentido necessário para ligá-los.
- De acordo com os comandos do controlador, a corrente enviada para o rotor é trocada para que se perpetue o movimento no motor.

Existem duas configurações básicas a se considerar sobre o fluxo de campo, que acaba por definir dois tipos de motores síncronos com escovas, a serem os motores que possuem fluxo de campo radial e aqueles que possuem fluxo de campo axial. Enquanto os motores de fluxo radial são os mais comuns e podem ser encontrados em uma série de diferentes aplicações, os de fluxo axial, apesar de existir em menor número de aplicações, apresentam alta densidade de potência e maior capacidade de aceleração, características desejadas em aplicações de alta performance como é o caso de um veículo elétrico [35].

Em relação aos ímãs, esses podem ser colocados de diversas maneiras no rotor e todas elas trabalham com as constantes de densidade do fluxo da lacuna de ar, indutância dos enrolamentos e a sua influência no torque de relutância. As principais configurações são ímãs de superfície, de superfície inserida, de interior e de interior com orientação circular. Independentemente da forma em que os ímãs são dispostos no motor, o princípio de funcionamento dessas máquinas é o mesmo. A forma de onda do campo eletromagnético é senoidal e é possível regulá-lo, permitindo o funcionamento em altas velocidades com potência constante e ao mesmo tempo não sofrendo do enfraquecimento de campo, essa última uma desvantagem comumente encontrada em motores que se utilizam de ímãs permanentes [35].

Abaixo a figura 3.11, que resume o funcionamento no rotor e estator desse tipo de máquina elétrica[34]:

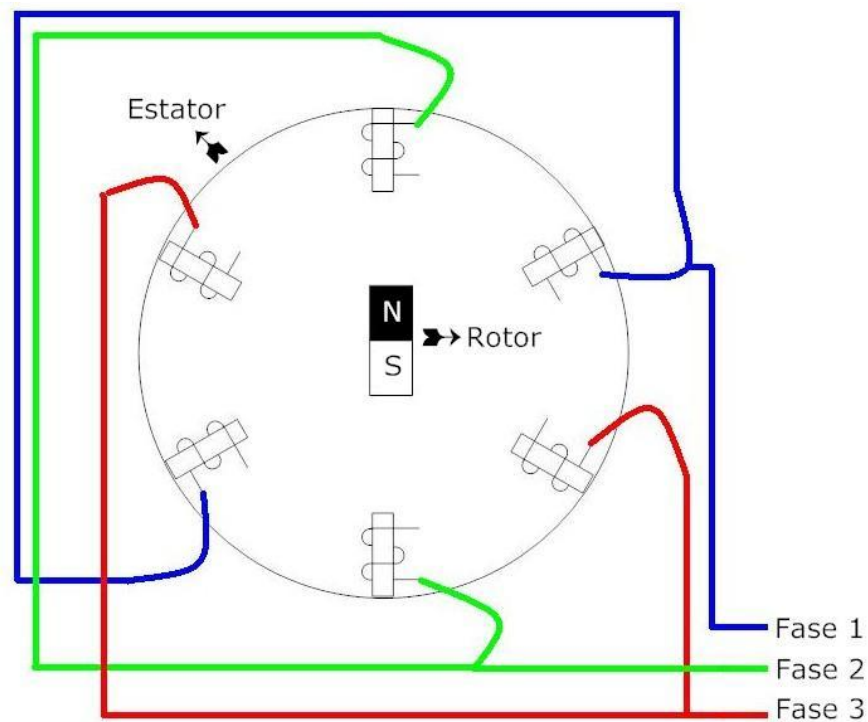


Figura 3.11 - Funcionamento de um motor de ímã permanente síncrono

3.2.1.1 Controle

O controle de transmissão utilizados nos motores de corrente contínua também são aqui usados e sua topologia é idêntica em ambos os casos. É necessário, porém, três tipos novos de controle e também o uso de pelo menos dois sensores para que o funcionamento dos motores síncronos de ímã permanente seja garantido: o controle por vetor, o inversor de frequência, um novo controle de velocidade e um encoder que recebe informações de sensores de posição e velocidade do rotor [35].

3.2.1.1.1 Inversor de frequência

A maioria dos tipos de bateria que estão em uso no mercado são alimentações de corrente contínua, então se faz necessário uma conversão para corrente alternada para que os motores que se utilizam desse tipo de corrente possam usufruir do mercado de baterias atual. Como dito anteriormente, os motores de corrente alternada utilizam-se de três fases e o inversor a ser aqui apresentado é também aquele utilizado para converter uma corrente contínua em corrente alternada de três fases [29].

O princípio de funcionamento desse instrumento eletrônico é simples; utilizando-se de seis transistores de potência, bem como o mesmo número de diodos retificadores e três indutores é possível a montagem de um circuito com seis sinais de controle, uma dupla desses sinais na base de cada um dos transistores e essas duplas possuem uma lógica inversa individualmente. Apresenta-se na figura 3.12 diagrama que mostra todas as conexões necessárias para a operação de controle desejada [35]:

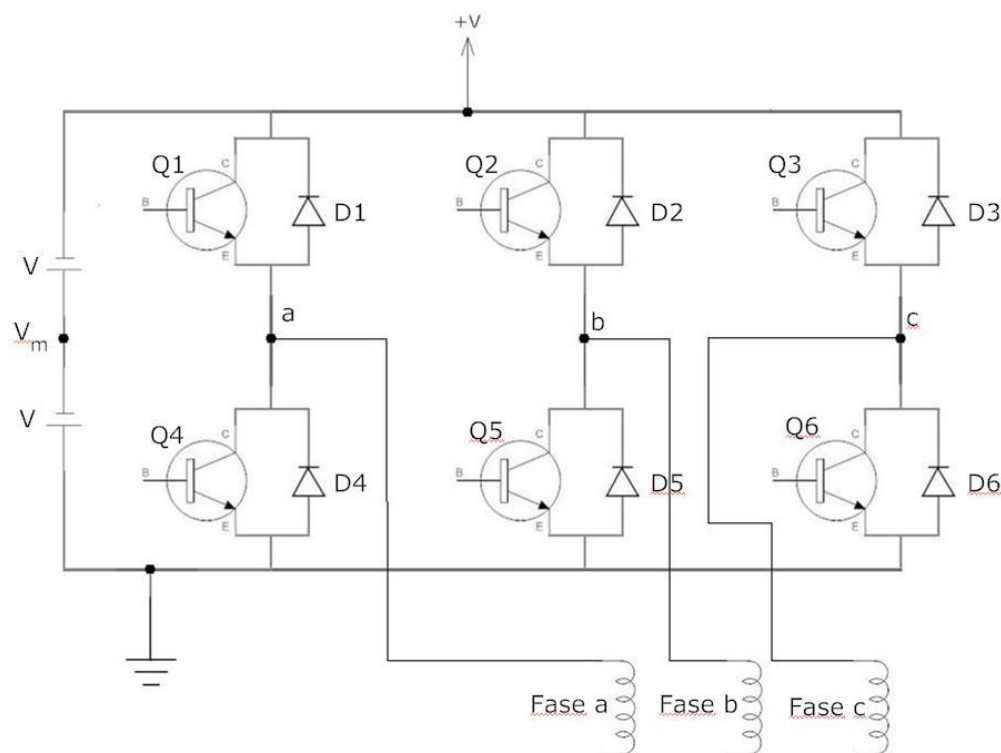


Figura 3.12 - Ligações para corrente alternada

O ramo superior não pode estar em funcionamento ao mesmo tempo em que seu ramo inferior de mesma fase e vice-versa. Diz-se que uma fase está "ligada" quando o ramo superior está ativo, e "desligada" quando o inferior que apresenta sinal positivo. A justificativa para esse tipo de operação é que as tensões a serem carregadas por cada uma das fases estará bem definida, independentemente da corrente que está passando por elas, sem esse tipo de mecanismo o controle da tensão não seria possível. As três fases são independentes umas das outras e o funcionamento comum entre elas é um ângulo de defasagem de 120° entre as mesmas [25].

3.2.1.1.2 Controle por vetor

Em meados do século XX os motores de corrente contínua eram os mais utilizados no mercado por causa do seu excelente resultado em controle dinâmico. Como o controle do fluxo de campo e do torque eram feitos de formas independentes, a estabilidade adquirida pelos motores de alimentação contínua era muito maior que nas máquinas alimentadas por correntes alternadas, onde os inversores apresentavam falhas nos transientes de corrente. Para resolver esse impasse foi criada a metodologia de controle por vetor, também chamada de controle de campo, que propõe um modelo matemático capaz de quebrar a dependência das variáveis fluxo e torque, permitindo assim um funcionamento aprimorado[35].

Antes de discutir-se sobre a metodologia de funcionamento dessa ferramenta, é preciso esclarecer o modelo dinâmico do motor síncrono em relação às indutâncias criadas através

do campo eletromagnético de cada uma das fases, que são chamados de eixo d (eixo direto) e eixo q (eixo de quadratura) e definir o valor desses eixos é importante para se criar o circuito equivalente desse equipamento e então definir o modelo matemático a ser utilizado. As equações a seguir são utilizadas para encontrar o valor das indutâncias q e d [25]:

$$L_d = 1.125 * \pi * \mu_0 * \left(\frac{T_{ph}}{P}\right)^2 * \frac{DL}{g_d} \quad (26)$$

$$L_q = 1.125 * \pi * \mu_0 * \left(\frac{T_{ph}}{P}\right)^2 * \frac{DL}{g_q} \quad (27)$$

Legenda:

μ_0 : Permeabilidade do ar

T_{ph} : Número efetivo de rotação na fase

P: número de pólos

L: Comprimento da pilha

D:Diâmetro do furo

g_d : Comprimento da lacuna de ar efetiva no eixo direto

g_q : Comprimento da lacuna de ar efetiva no eixo de quadratura

Com esses valores em mãos, pode-se agora controlar o valor do torque através do controle do fluxo seguindo as equações a seguir:

$$T_e^* = \frac{3}{2} * \frac{P}{2} * (\lambda_{af} * i_s^* * \sin(\delta^*) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) * (i_s^*)^2 * \sin(2\delta^*)) \quad (28)$$

$$\lambda_m^* = \sqrt{(\lambda_{af} + L_d * i_s^* * \cos(\delta^*))^2 + (L_q * i_s^* * \sin(\delta^*))^2} \quad (29)$$

Legenda:

T_e^* : Torque de referência eletromagnético

λ_m^* : Comando das ligações das mútuas lacunas de ar

λ_{af} : Fluxo da armadura devido aos ímãs do rotor

i_s^* : Corrente no estator de referência

δ^* : Ângulo de torque

Esse modelo é dependente do controle de velocidade do motor. Isolando a expressão i_s^* que não é multiplicada pelo coseno da equação 3, resolvendo então a equação 4 e logo após

isolando o termo i_s^* é possível chegar a uma expressão de corrente do estator aplicável às correntes de fases com uma simples transformação matricial. A equação final para a corrente i_s^* e a transformação necessária para a matriz estão descritas abaixo:

$$i_s^* = \frac{\sqrt{(\lambda_m^*)^2 - \lambda_{af}^2 - 2\lambda_{af}(i_s^* \cos(\delta^*))}}{L_d} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} i_{as}^* &= i_s^* \sin(\theta_r + \delta^*) \\ i_{bs}^* &= i_s^* \sin(\theta_r + \delta^* - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{cs}^* &= i_s^* \sin(\theta_r + \delta^* + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (31)$$

Legenda:

i_{as}^* : Corrente instantânea do estator, fase a.

i_{bs}^* : Corrente instantânea do estator, fase b.

i_{cs}^* : Corrente instantânea do estator, fase c.

Com isso, o controle por vetor está completo mas isso não é suficiente para que o veículo consiga variar sua velocidade. Assim, um controle de velocidade faz-se também necessário nesse tipo de operação.

3.2.1.1.3 Controle de velocidade

Diferentemente dos controladores de velocidade para motores de correntes diretas, os controladores utilizados em motores síncronos são do tipo Proporcional Intergrativo (PI) ou Proporcional Integrativo Derivativo (PID), que eliminam o erro de estado estacionário e para o caso do controlador PID proporciona uma rápida resposta de velocidade. O fluxo de campo é gerado a partir da demanda de velocidade e enquanto a magnitude da força eletromagnética não for superior à tensão de alimentação contínua do inversor o fluxo de campo e as frequências de operação estão garantidas e o funcionamento é garantido. Quando, porém, a magnitude da força eletromagnética se tornar maior que a tensão de alimentação contínua, o controle das correntes do estator se torna muito mais complexo, interferindo assim também no controle do torque. A estratégia adotada para resolver essa problemática é o enfraquecimento do campo que se baseia em diminuir a força eletromagnética em proporção inversa ao aumento de velocidade, através dos controladores acima citados. Salienta-se que o torque deve ser diminuído com o aumento de velocidade, de forma a manter a potência permitida pela entrada CC dentro dos seus parâmetros seguros caso contrário haveria perdas por calor grandes devido à corrente excessiva podendo culminar em falha no motor[34].

Para o pleno funcionamento desse modelo, é necessário retroalimentação através de sensores de posição e velocidade do motor, ligados tanto ao controlador de torque quanto ao controlador de velocidade, e assim o módulo de controle básico para motores síncronos

com escovas está completo. Um diagrama de blocos resumindo todas as partes importantes desse controle é apresentado na figura 3.13[35].

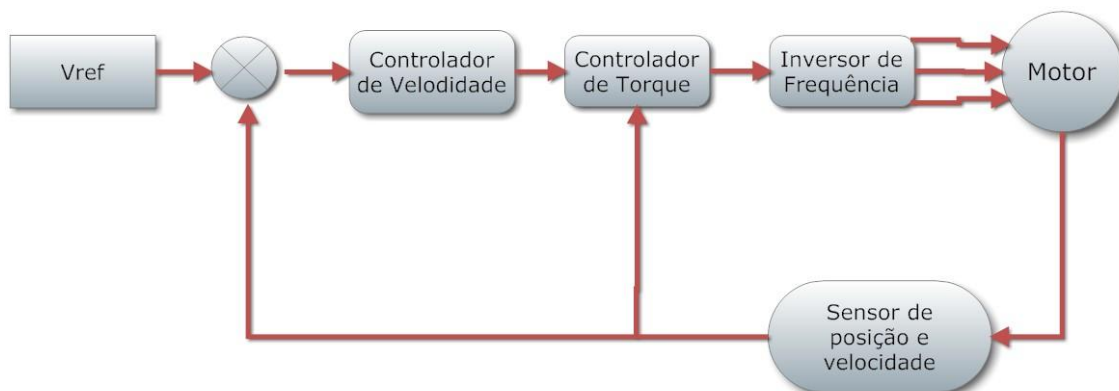


Figura 3.13 - Malha fechada do controle do motor de ímã permanente síncrono

3.2.3 Motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua (SPM Motor).

As semelhanças entre esse tipo de motor e o motor síncrono de ímã permanente com escovas são enormes, porém seu funcionamento difere em alguns importantes pontos. Quanto à arquitetura de suas partes, podemos ter o modelo do motor síncrono com escovas como base e dele só se fazem necessário retirar as escovas de carvão que estão ligadas ao rotor e ao invés delas inserir um novo sensor que deve informar a posição do ímã do rotor, o mais utilizado para essa operação é o sensor Hall, que são muito mais simples que os encoders de posição necessário para o funcionamento de motores síncronos com escovas. Apesar de a diferença estrutural ser pequena, é possível observar uma série de mudanças, que são [29]:

- Uma densidade de potência 15% maior em média que os motores síncronos com escovas. Isso se deve ao fato de que a forma de onda da densidade de fluxo ser trapezoidal ao invés de senoidal, aumentando a razão entre o rms e pico.
- O ciclo exigido nas correntes de fase é 33% menor, diminuindo significativamente as perdas por calor e condução devido ao fato de que esse motor utiliza um número de transistores menor em seu inversor.
- As correntes que alimentam esse motor estão presentes na forma retangular, ao invés de senoidal, o que contribui para um controle mais robusto e muito mais simples, sem a exigência do controle por vetor.

As desvantagens do uso desse tipo de motor estão no preço, pois ele se utiliza de ímãs de alta densidade magnética que possuem um alto custo e uma considerável instabilidade do torque podendo chegar a 2% de imprecisão, o que é indesejável em sistemas que exigem alta eficiência energética, como por exemplo, seu uso em veículos elétricos [29].

Como já dito, o controle utilizado nessa aplicação é muito mais simples do que aquele que é encontrado em motores síncronos com escovas, mas ainda é mais complexo que o dos motores de corrente contínua apresentados no item "I". O controle de transmissão apresentado nesse item continua valendo para essa seção. Um novo equipamento aqui utilizado são os sensores Hall, abaixo uma breve explicação sobre seu funcionamento e principais características [29]:

Sensores de efeito hall são transdutores capazes de variar sua tensão de saída de acordo com um campo magnético e seu uso mais comum se faz em sensores de corrente, de fluxo, de posição e velocidade. Existem hoje no mercado sensores desse tipo com saídas analógicas ou digitais, lineares ou bipolares, de alta ou baixa frequência. A importância desse tipo de sensor é a facilidade de operação, bastando um ímã e o próprio sensor para operação e também a robustez que possui quanto a vibrações, calor, sujeira, unidade e choque. Todos os efeitos indesejados que podem arruinar outros tipos de sensores produzem pequenas ou nenhuma mudança no efeito do sensor e na veracidade do seu dado[36]. Ele também é muito barato, versátil e seguro, uma ótima escolha para qualquer uma das quatro aplicações citadas acima [36].

Na figura 3.14 apresenta-se resumo do sistema dinâmico dessa topologia em diagrama de blocos:

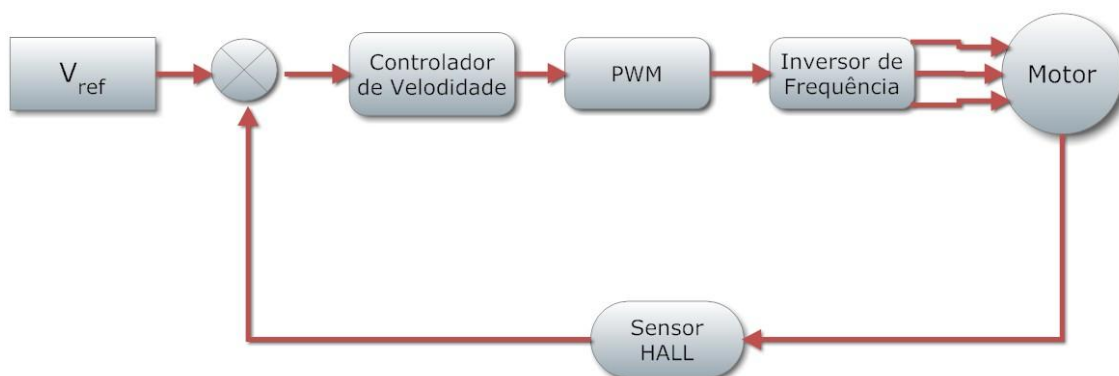


Figura 3.14 - Fluxograma do sistema do motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua

3.2.4 Motor de corrente alternada de indução (Induction Motor).

Se os motores de corrente contínua são os mais utilizados em eletrônicos e eletrodomésticos, nas aplicações industriais os motores de indução trifásica são utilizados em um número superior de aplicações se comparado com qualquer outro tipo de motor. São motores robustos, confiáveis e com um custo baixo se comparado com a média de todos os motores aqui apresentados. As partes que compõem esse motor são idênticas às apresentadas nas seções anteriores, o rotor e o estator, porém a forma que é ligada para criar o campo eletromagnético girante é diferente de todas até aqui apresentadas.

Motores de indução trifásica são capazes de criar o campo girante no estator, devido à natureza de sua alimentação alternada. Esse campo induz a criação de uma força eletromagnética no rotor, habilidade tão importante que o próprio nome do motor é simbolizado por esse efeito. Existem dois tipos fundamentais de montagem dos motores de indução, a saber: o motor gaiola de esquilo e o motor com rotor bobinado[25]. Será feita uma breve descrição sobre esses tipos de motor:

a) Motor gaiola de esquilo: Nessa topologia de motor, várias barras grossas de material condutor são colocadas ao redor de chapas finas de aço em distâncias pequenas e constantes e curto-circuitadas entre si no seu começo e fim, de forma a lembrar uma gaiola onde se aprisionam esquilos. Quase 90% dos motores comerciais são fabricados nessa especificação, uma realidade que também é encontrada no universo de veículos elétricos atuais. Eles podem chegar a potência de algumas centenas de kilowatts e são capazes de suportar carga altas[30].

b) Motor com rotor bobinado: Uma série de anéis deslizantes são ligados aos enrolamentos do motor, o que auxilia no uso de resistências internas e contadores. Esse motor é ideal para aplicação em que exista uma grande inércia e em que essa inércia seja quebrada utilizando-se um torque de saída muito alto utilizando o mínimo de corrente necessária para acelerar o sistema. O grande problema desse tipo de montagem é a manutenção que deve ser dada aos anéis deslizantes e escovas do motor, um custo que a mais que não existe nos motores de gaiola de esquilo [30].

Explicado os tipos de motores e suas aplicações pode-se agora partir para uma abordagem interessante sobre a não sincronia desse tipo de motor: isso se deve ao fato de que rotor e estator não giram à mesma velocidade, provocando um deslizamento entre as peças. O rotor tenta sempre alcançar a o fluxo rotacional do estator, porém isso nunca ocorre na prática [25]. O efeito importante a ser observado é que, ao aumentar a carga duas reações diferentes podem ocorrer: a primeira, já esperada, é a diminuição da velocidade de rotação do rotor; uma segunda reação possível é o aumento da velocidade de escorregamento. As equações para a velocidade do estator (que é síncrona) e para a porcentagem de escorregamento do motor podem ser encontradas logo abaixo [30]:

$$V_s = 120 * \frac{f}{p} \quad (32)$$

$$\%escorregamento = \frac{V_s - V_b}{V_s} * 100 \quad (33)$$

Legenda:

V_s : Velocidade síncrona no estator.

V_b : Velocidade assíncrona no rotor (também chamada de velocidade base).

Um dos grandes problemas desse tipo de motor está na corrente de arranque, que pode chegar a valores altos, algo na casa dos 1400% da corrente requisitada do motor quando ele está à plena carga. O torque desenvolvido também é muito mais alto que o necessário, e somente com o aumento da velocidade esses valores passam a entrar em uma faixa aceitável de torque/corrente de operação e também contemplam um valor viável de eficiência. É também observado nesse tipo de motores que a eficiência da energia enviada aumenta de acordo com o aumento da rotação do motor, chegando a um valor ótimo entre 75 e 80% da velocidade de rotação máxima [25].

O modelo matemático que rege a função de torque desse tipo de motor é simples, como pode ser conferido nas equações descritas a seguir[25]:

$$T - T_i = J * \frac{W_m}{dt} + W_m \frac{dJ}{dt} \quad (34)$$

Legenda:

T = Torque do motor

T_i= Torque na carga

W_m=Velocidade angular do motor

J=Momento de inércia do sistema

No caso de controladores que tratam a inércia de veículo como uma constante, o termo $\frac{dJ}{dt} = 0$, podemos então simplificar a equação para a seguinte forma à seguir[25]:

$$T = T_i + J * \frac{W_m}{dt} \quad (35)$$

É importante salientar que o torque é uma função dependente do quadrado da velocidade, enquanto a potência varia com o cubo da velocidade, isso em uma aplicação onde a carga, velocidade e torque necessários variam com o tempo, que é o que ocorre em aplicações para veículos elétricos [26]. Os primeiros tipos de motores de indução era desenvolvidos para desenvolver um torque específico durante todo seu ciclo até sua velocidade máxima. Esse tipo de atuação era muito ineficiente em várias aplicações, visto que quanto maior a velocidade atingida, menor é o torque requerido pelo sistema, desperdiçando dessa maneira uma quantidade muito grande de energia[26].

Outro problema comum é sobre o fator de potência quando em cargas muito baixas[27]. A corrente que alimenta um motor de indução possui duas componentes, uma delas, a parte

ativa, varia diretamente com a carga; a outra parte, a reativa, é a corrente de magnetização do rotor, e o valor dessa corrente é independente da carga e velocidade. Ou seja, quando utilizado em cargas baixas, um motor trifásico possui um valor de fator de potência muito baixo, chegando a valores de até 0.1. Isso também altera a forma de onda que o motor consome, não sendo mais senoidal, o que mais uma vez pode diminuir a eficiência do sistema[25].

Módulos de controle inteligente podem diminuir e até mesmo desaparecer com algumas das fragilidades desse tipo de motor, aumentando a eficiência de operação e diminuindo problemas causados por aumento de temperatura (correntes muito altas, torque desenvolvido além da exigência da carga, dentre outros). Existem três estratégias principais de controladores para os motores de indução trifásicos, a ser [30]:

3.2.4.1 Controle Escalar

Assim como no controle de velocidade dos motores DC, esse método se utiliza de um PWM, com a diferença que nesse caso existe um microcontrolador que recebe os sinais do PWM e então trabalha para que a razão tensão por frequência seja mantida constante. É um controle simples, que não depende de qualquer componente em feedback e que também não necessita de muito conhecimento sobre o funcionamento do motor e por essas razões é largamente utilizado. Suas fragilidades encontram-se em ter um transiente longo, visto que as mudanças em seus transistores são pré-definidas e também na falta de controle do torque, que então é uma função variante com a carga e sem qualquer tipo de controle.

3.2.4.2 Controle Vetorial

Utiliza o mesmo princípio e técnica do controle apresentado nos motores síncronos com escovas, já apresentado. Estudos de uma versão desse tipo de controle em que não seja necessário o uso de sensores e encoders estão em fase de pesquisa. Em caso de sucesso, o custo e complexidade do sistema desse tipo de controlador diminuiriam consideravelmente.

3.2.4.3 Controle de Torque Direto

Derivado do controle vetorial, com a diferença de que ele não possui um padrão de comutação e é necessário um modelo adaptável para sua operação. Muito mais complexo que os outros dois tipos de controle possíveis, o controle de torque direto é o que produz o melhor resultado quanto à eficiência e ao consumo de energia. Sua resposta transiente é também a menor de todas, visto que o tempo de resposta é bem menor que nos outros casos. Existem pesquisadores que estão tentando fazer uma forma de aplicar uma inteligência artificial no local de um modelo matemático para controlar o sistema, com o objetivo de diminuir as fragilidades de ondulação que ocorrem no torque e fluxo de carga,

além de melhor ainda mais o desempenho do sistema. Abaixo diagrama de blocos que resume os recursos e suas ligações para esse tipo de sistema[30]:

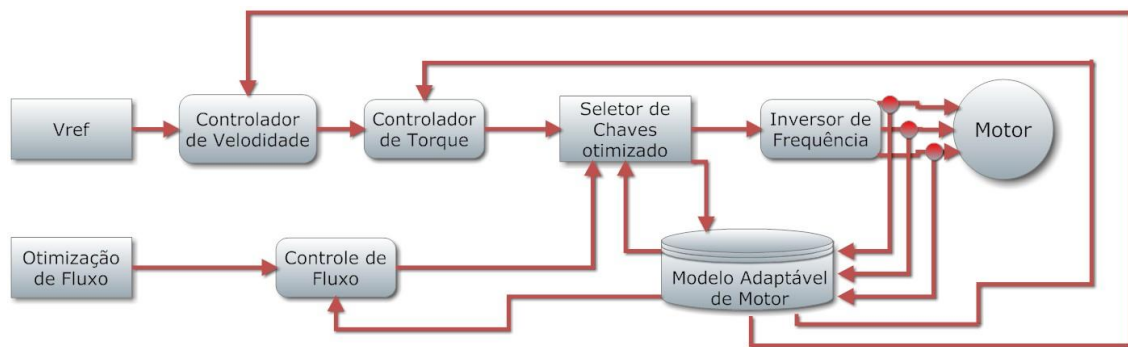


Figura 3.15 - Fluxograma do sistema do Motor de corrente alternada de indução

3.2.5 Motor de corrente alternada de relutância (Reluctance Motor).

No que tange a produção de larga escala para veículos elétricos com as quatro opções anteriormente apresentadas, é possível observar um problema comum a todas essas opções: eles se utilizam de materiais com propriedades magnéticas, em alguns casos de ímãs com alta densidade magnética. Esses elementos, encontrados na natureza, são escassos e seria incapaz de, por exemplo, suprir toda a frota veicular mundial existente. O motor de relutância chaveada, porém, é o único motor aqui apresentado que não possui em sua composição qualquer ímã permanente [25].

O estator é o mesmo utilizado nos motores de corrente direta, vários pólos que possuem bobinas que quando são alimentadas formam um campo eletromagnético girante ao redor do rotor. O grande diferencial está no rotor: ele não possui bobinas, enrolamentos, ímãs, escovas ou comutadores, sendo simplesmente um laminado de ferro com pólos salientes, pólos esses que também são utilizados no estator. O funcionamento desse tipo de máquina é muito simples, primeiro é necessário observar a figura 3.16, que nos mostra a situação do rotor e estator desse tipo de motor em um dado momento de operação. Podemos notar que o pólo do rotor, "A" encontra-se próximo do pólo do estator N. Caso seja desejado que o motor gire de forma que esses pólos se encontrem, basta aplicar uma corrente no pólo do estator N (com o seu valor inverso no estator N') [37]. O fluxo criado irá puxar o rotor para esse sentido, culminando na situação que ocorre na figura 17 (É importante lembrar que o mesmo efeito ocorre com os pólos O e O' do estator em conjunto com os pólos B e B' do rotor). A corrente em N é então desligada e para continuar o movimento basta acionar a corrente nos pólos M e M', atraindo assim o rotor para continuar a sua rotação, criando assim seu movimento angular [38]. As figuras 3.16 e 3.17 apresentadas a seguir nos mostram esse tipo de funcionamento.

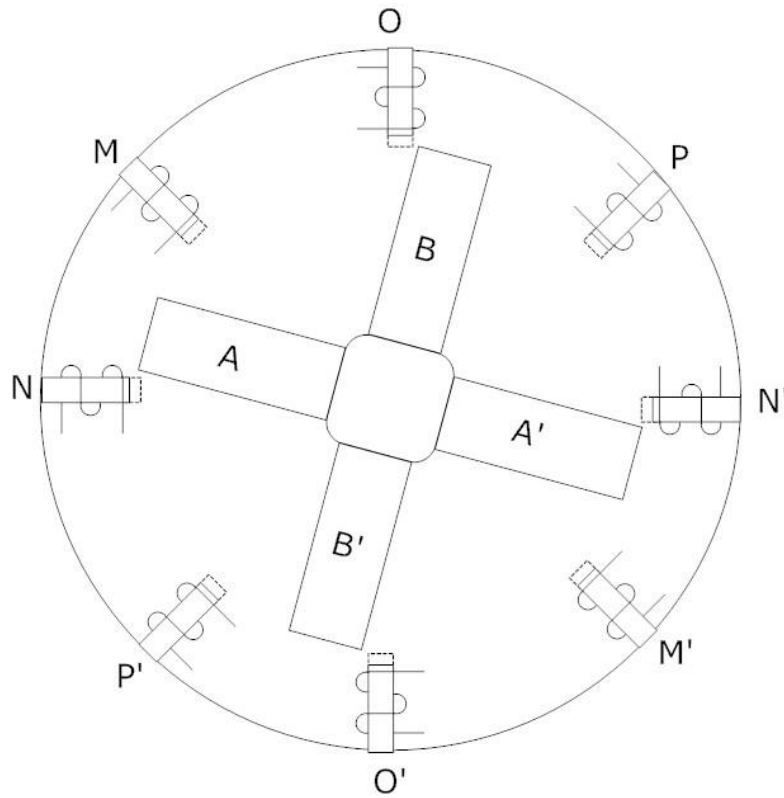


Figura 3.16 - Funcionamento do motor de relutância chaveada (parte 1)

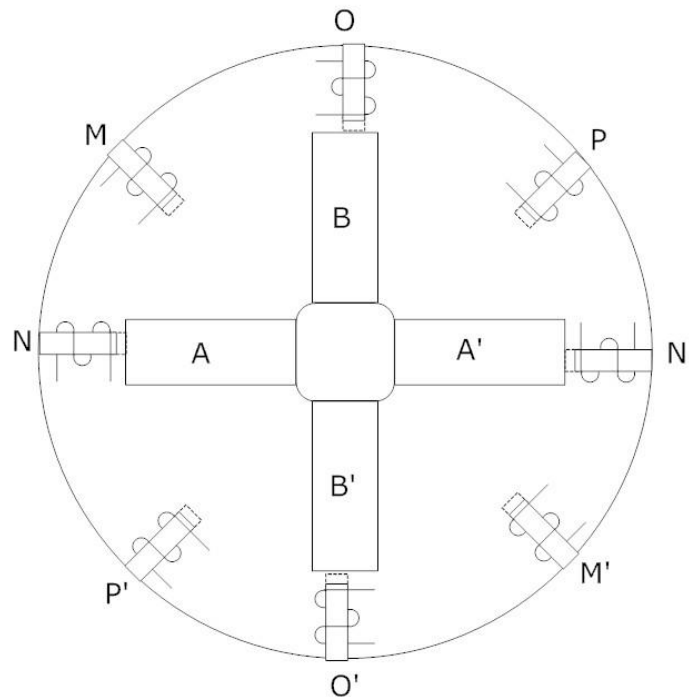


Figura 3.17 - Funcionamento do motor de relutância chaveada (parte 2).

Por fim, o controle requerido por esse tipo de motor é muito simples e robusto, ele é chamado de controle de ponte assimétrica e é capaz de criar o movimento em ambas direções e também o freio regenerativo, no qual o motor passa a se comportar como gerador e alimentar o sistema ao invés de puxar energia. A topologia abaixo registra o

projeto de uma das fases, sendo as duas outras fases cópias idênticas dessa primeira [38], como apresentado na figura 3.18.

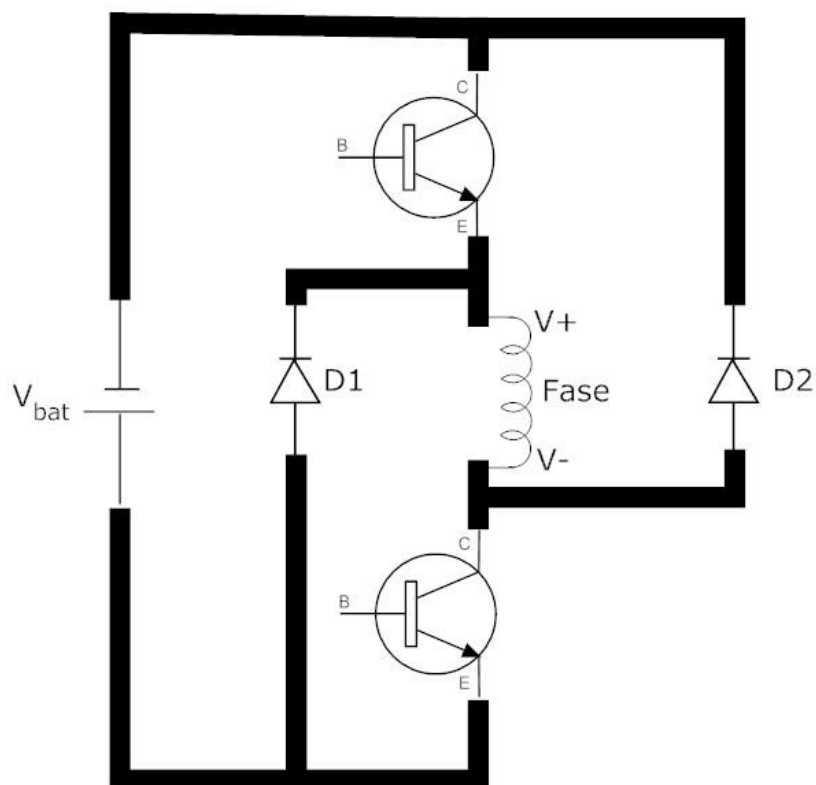


Figura 3.18 - Controle de ponte assimétrica.

Finalizando a seção de motores, detalham-se as principais vantagens e desvantagens de cada topologia de motor apresentada no capítulo nas tabelas numerada de 3.2 à 3.6 encontradas abaixo:

Tabela 3.2 - Motor de corrente contínua com rotor bobinado (*DC Wound Motors*)

Vantagens	Desvantagens
Simplicidade de implementação.	Necessidade de manutenção das escovas
Custo baixo	Baixa eficiência do sistema (sempre menor que 90%)
	Baixa densidade de potência

Tabela 3.3 - Motor síncrono de corrente alternada, escovado e excitado por corrente contínua (SBM Motor)

Vantagens	Desvantagens
Alto torque de partida	Corrente de magnetização ao efeito Joule
Controle simples e robusto	Escovas de carvão requerem manutenção
Alta eficiência na maior parte do regime da carga	Eficiência baixa em carga plena

Tabela 3.4 - Motor síncrono de corrente alternada, sem escovas e excitado por corrente contínua (SPM Motor)

Vantagens	Desvantagens
Uma densidade de potência 15% maior em média que os motores síncronos com escovas	Alto custo
O ciclo exigido nas correntes de fase é 33% menor	Considerável instabilidade do torque podendo chegar a 2% de imprecisão
As correntes que alimentam esse motor estão presentes na forma retangular	

Tabela 3.5 - Motor de corrente alternada de indução (Induction Motor)

Vantagens	Desvantagens
São motores robustos, confiáveis	Alta eficiência somente quando alcança velocidade de cruzeiro
Custo baixo se comparado com a média de todos os motores aqui apresentados	Altos valores da corrente de arranque (podendo chegar a 1400%) da corrente requisitada do motor quando ele está à plena carga.
Rotor e estator não giram à mesma velocidade, provocando um deslizamento entre as peças	

Tabela 3.6 - Motor de corrente alternada de relutância (Reluctance Motor)

Vantagens	Desvantagens
Simple e robusto	Necessita de controle eletrônico
Capaz de criar o movimento em ambas direções	Apresenta alto grau de ruído
Freio regenerativo	

CAPÍTULO 4 - REQUISITOS

Na seção a seguir são retratados os principais indicadores de baterias e motores, que compõem o alicerce para propor-se um procedimento eficaz na rotina de otimização de baterias e motores elétricos. O primeiro passo para que seja iniciada a explicação da metodologia a ser aplicada para a escolha otimizada do melhor conjunto motor-bateria é apresentar quais variáveis são importantes, para então possibilitar a criação de uma tabela de avaliação. Um veículo elétrico para ser competitivo com os modelos a combustão necessita de alta eficiência, tanto para motor quanto bateria, volume de baterias reduzido, deve ser leve, possuir uma quantidade de energia alta e ter preços acessíveis ao mercado. Vantagens dos veículos elétricos sobre os automotivos à combustão, como a sustentabilidade e a necessidade de manutenção também precisam ser considerados para tornar o método mais completo. Segurança dos passageiros, motorista e demais pessoas que entram em contato com o veículo, bem como os controladores incorporados tanto ao sistema do motor quanto ao de baterias também permeiam entre os índices necessários para se definir as variáveis. À seguir serão analisados os principais índices que impactam na escolha de um determinado modelo de bateria ou motor como melhor ou pior no momento de comparação dentre todos os exemplos existentes, começando pelas variáveis importantes da bateria, logo após as do motor e por fim uma análise de índices que devem ser avaliados para motor e bateria em conjunto, chamado de sinergia.

4.1 Baterias

4.1.1 Eficiência

Nem toda energia fornecida pelo banco de baterias chega ao seu destino final, que é o motor. É muito importante saber quanto da energia da fonte é perdida em calor, resistências, circuitos de controle dentre outros. Quanto maior o valor da eficiência, melhor o desempenho do sistema e maior será a autonomia desenvolvida pelo veículo instalado com esse banco de baterias. Outro fator determinante é que, com valores de eficiência muito altos (como por exemplo, 98%) a perda por calor é mínima, auxiliando a manter a temperatura das baterias dentro do seu regime ótimo de operação. Para sabermos empiricamente a eficiência de um banco de baterias, devemos seguir a fórmula a seguir:

$$Eficiência[\%] = \frac{(Energia\ produzida - Perdas)}{Energia\ Produzida} * 100 \quad (37)$$

O empecilho nesse caso é calcular todos os valores de perdas que ocorrem nos condutores de energia até chegar ao sistema do motor. Para simplificar a análise leva-se em consideração somente a corrente inicial, que sai das baterias e a corrente final, a qual entra no sistema do motor. Então obtemos:

$$Eficiência [\%] = \left(\frac{i_{bat} - i_{mot}}{i_{bat}} \right) * 100 \quad (38)$$

Outro fator a ser considerado é que a eficiência das baterias depende da quantidade de energia que é requisitada pelo sistema. Quanto maior for essa energia, menor será a eficiência. Alguns fabricantes apresentam as informações de eficiência para diferentes valores de descarga de suas baterias, o que auxilia o processo de escolha.

4.1.2 Carga Máxima Nominal

Tempo de recarga é um fator crucial na escolha de baterias, e esse tempo depende diretamente da quantidade de energia que é possível de se absorver da rede elétrica que recarregará o banco. Existem duas preocupações principais com essa variável: a primeira refere-se fator fundamental é o valor de carga possível em comparação com sua capacidade nominal, ou seja, de qual fração de "C" é possível carregar o banco de forma segura, sem perdas e no menor tempo possível?

A segunda implica em um tópico não abordado por esse documento, que é o ponto de recarga: exatamente quanto de potência esse ponto é capaz de repassar ao veículo? É necessário certificar-se que esse local possua, pelo menos, a capacidade de fornecer o valor de carga máxima nominal para as baterias, diminuindo dessa maneira ao máximo o tempo de espera enquanto são carregadas.

4.1.3 Custo

Ao se comparar o preço de cada uma das estruturas que compõe um veículo, as baterias são uma das mais dispendiosas. Os usos de materiais escassos ou de uma lógica de controle avançado contribuem para um valor muito alto a se cobrar em um banco de baterias. Para se ter uma ideia, atualmente nos Estados Unidos existe uma lei governamental de incentivo ao veículo elétrico de \$ 7.500,00 [z] e ainda assim o custo de um desses veículos é maior que de um veículo de combustão interna. Boa parte dessa discrepância deve-se ao banco de baterias.

Tornando esses valores mais visuais, o gráfico e tabela a seguir mostram os valores cotados dos principais sistemas que compõem um carro por um Projeto de Veículo Elétrico na UnB, o projeto Ciclar:

Tabela 4.1 - Cotação dos principais sistemas do veículo do projeto Ciclar

Item	Preço [R\$]	Preço (%)
Baterias + Controlador Baterias	13000,00	38,01
Motor + Controlador Motor	9000,00	26,32
Transmissão	3500,00	10,23
Outros	2000,00	5,84

Tabela 4.1(continuação) - Cotação dos principais sistemas do veículo do projeto Ciclar

Suspensão	1300,00	3,80
Painel de Instrumentos	1300,00	3,20
Freio	1100,00	3,20
Chassis	830,00	2,43
Direção	780,00	2,28
Controladores (outros)	600,00	1,75
Bancos	450,00	1,32
Farol+Faroletes	200,00	0,58
Piso	100,00	0,29
Caixa de Fusíveis	40,00	0,12

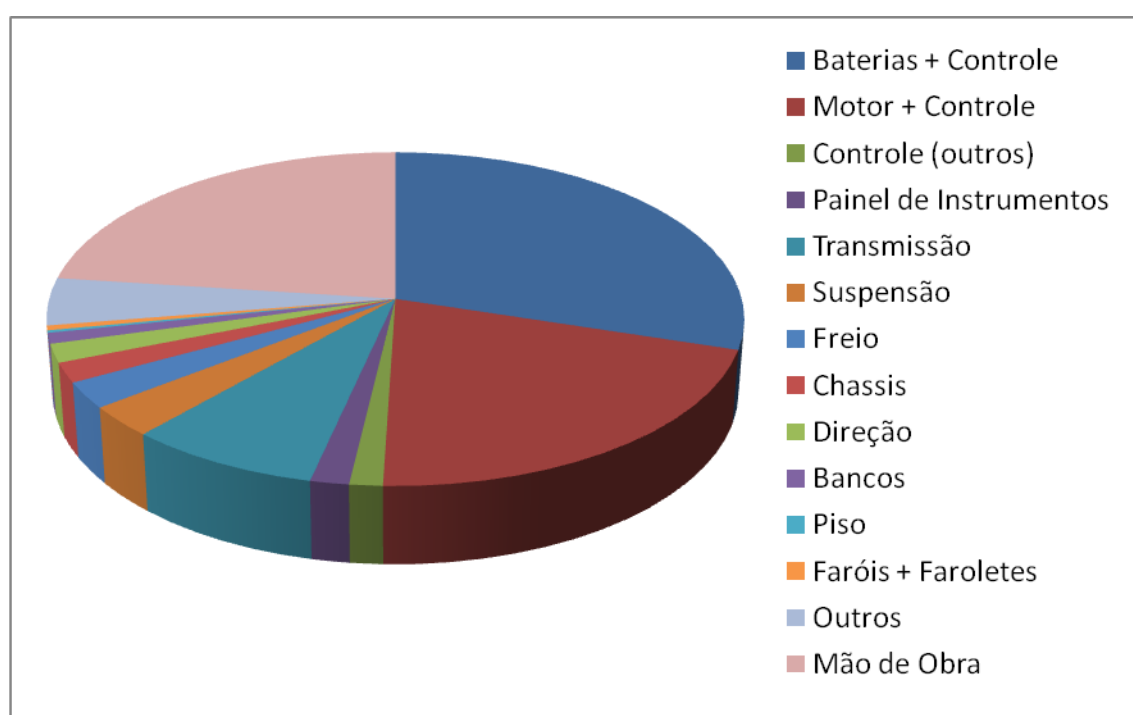


Figura 4.1 – Gráfico da cotação dos principais sistemas do veículo do projeto Ciclar.

4.1.4 Ciclos

Durante quantos anos poderemos utilizar as baterias? Uma pergunta muito pertinente, que se remete diretamente ao número de ciclos possíveis de se efetuar com as baterias. Como a deterioração da capacidade da bateria normalmente é muito mais rápida do que as peças mecânicas ou instrumentos utilizados na eletrônica embarcada do veículo, antes que a vida útil da maioria das peças do carro acabe as baterias irão encontrar a sua data de expiração primeiro. Essa variável trabalha de forma diretamente proporcional com a constante de profundidade de descarga, sendo o balanceio entre ambas muito importantes.

Outro ponto importante a ser discutido é quanto ao tipo de aplicação que será executado pelo veículo: qual será o uso semanal do mesmo e por quanto tempo essa operação será

executada por dia. Por exemplo, um carro oficial de uma empresa provavelmente só irá trabalhar durante o período em que a empresa esteja em funcionamento, normalmente entre segunda e sexta-feira, ou seja, um gasto de 260 ciclos ao ano.

É importante também lembrar que rotular uma bateria como não mais utilizável significa que a energia com a qual a mesma é capaz de alimentar o sistema, que diminui com o passar dos ciclos, atingiu o patamar de menor do que 80% de sua capacidade nominal. Esse ponto é utilizado como um marcador pelo fato de que após atravessar a barreira dos 80% de capacidade total, a degradação da bateria se dá de uma maneira muito mais rápida do que a deterioração que ocorre após a parte desses 20% iniciais de capacidade.

Através da tabela 4.19 apresentada a seguir, é possível ter uma ideia do tempo em que é possível aproveitar-se das baterias para diferentes números de ciclos, que foram escolhidos com base dos valores possíveis de todas as baterias apresentadas na revisão bibliográfica e com diferentes regimes de trabalho possíveis.

Tabela 4.2 - Exemplos de tempo de duração das baterias de acordo com a regularidade de uso.

Regularidade	250 ciclos	500 ciclos	1000 ciclos	1500 ciclos	2000 ciclos
2x semana	2.40 anos	4.81 anos	9.61 anos	14.42 anos	19.23 anos
3x semana	1.60 anos	3.20 anos	6.41 anos	9.61 anos	12.82 anos
5x semana	0.96 anos	1.92 anos	3.85 anos	5.78 anos	7.69 anos
6x semana	0.8 anos	1.60 anos	3.21 anos	4.81 anos	6.41 anos
7x semana	0.7 anos	1.37 anos	2.74 anos	4.1 anos	5.48 anos

4.1.5 Profundidade de descarga

Todos os cálculos de autonomia a serem feitos devem respeitar esse percentual máximo a ser utilizado, com uma margem de erro, se possível, para evitar ao máximo passar desse valor. Deve-se também considerar a situação em que se utiliza uma quantidade de energia que confere um uso inferior ao especificado na profundidade de descarga ideal. Nesse caso, ocorre um aumento no número de ciclos que as baterias conseguirão desempenhar.

Superdimensionar sistemas para que utilizem uma quantidade menor da capacidade poderia ser uma solução para o problema de quantos anos duram as baterias em uso, mas

isso normalmente é impossibilitado por questões de custo, espaço e peso do conjunto, fatores de fundamental importância no dimensionamento de um veículo.

4.1.6 Manutenção

Existem três problemas principais que afetam o banco de baterias com regularidade e que devem ser tratados rotineiramente, de forma a manter o sistema eficiente: o desbalanceamento de capacidade entre as baterias, falhas do circuito de controle e de carga e, por último, mau contato nos conectores das baterias.

Desbalanceamento: Ao executar vários ciclos completos de carga e descarga, nem todas as baterias encontradas em um banco apresentam a mesma curva de desempenho e quantidade de energia armazenável, devido ao fato de que existem microdiferenças de material de uma bateria para outro, dessa forma não permitindo que sejam idênticas em sua capacidade. Por conseguinte, a ocorrência de que, ao se descarregar as baterias, a energia que é fornecida ao sistema não vem de uma forma uniforme, em um comparativo dentre todas as baterias. Ocorre que algumas fornecem um pouco de energia a mais do que outras, contribuindo para o efeito do desbalanceamento.

A forma mais simples de combater esse problema é através do uso de um recarregador capaz de executar a ação de balanceamento entre as baterias, de forma automática e sem a necessidade de se carregar as baterias de maneira individual. Caso isso não seja possível, a pessoa responsável pela manutenção deve ter uma forma de acesso ao banco, retirar as baterias que apresentam carga atual em quantidade menor que a média, e recarregá-las individualmente, até o valor médio desejado. A influência dessa variável para a categoria manutenção está diretamente ligada a qual das duas necessidades é apresentada pelo modelo de baterias.

Uma das maneiras mais simples de se monitorar a capacidade das baterias é manter a tensão de cada uma delas em observação. Dessa forma, caso sejam observadas diferenças notáveis entre as baterias com maior tensão e aquelas que apresentam menor tensão, sabe-se qual precisa ser mais carregada. Diferenças grandes podem ser consideradas perigosas quando existe uma alteração de mais de 10% do valor nominal de tensão entre as baterias com maior tensão em comparação com aquelas que apresentam menor tensão.

Falhas no circuito de controle e recarga: Com o advento da eletrônica, muitos benefícios foram atingidos, permitindo o uso de circuitos cada vez mais sofisticados e operações mais rápidas e eficazes. Porém, alguns problemas ainda comuns na parte eletrônica são os erros de processamento e de lógica ou sintaxe de programação e que podem ocasionar adversidades para o sistema de baterias. Apresentação de informações errônea, não recarga das baterias ou até mesmo pane elétrica são alguns dos mais sérios problemas que se pode passar devido à falha em circuitos. A chance de ocorrer uma falha em uma das

topologias eletrônicas é diretamente proporcional ao nível de complexidade do sistema, ou seja, arranjos simples tendem a falhar muito menos do que em modelos complexos.

Mau contato nos conectores: Vibrações, mudanças de temperatura e longos períodos sem uso beneficiam para o mau contato entre os conectores das baterias. Isso pode acarretar em abrir o circuito de potência ou de manter um fornecimento pobre ou intermitente. A solução para isso é mais simples que para os outros dois contratempos apresentados: basta que os conectores sejam re-apertados, re-rosqueados ou re-soldados, criando a sensação de firmeza necessária para manter a carga/descarga de energia estável. Alguns designs de conectores são mais robustos que outros, porém é uma questão de design da caixa da bateria quais desses conectores poderão ser utilizados ou não. As baterias de chumbo-ácido utilizam conectores (fig 4.2) cuja fixação é segura e muito firme, dificilmente será requisitada manutenção nesse item por mau contato.

Já os conectores apresentados na fig. 4.3 são mais suscetíveis aos efeitos negativo apresentados, por isso é necessário uma manutenção periódica nesse tipo de bateria, a fim de garantir seu pleno funcionamento.



Figura 4.2: Conector de bateria chumbo ácido.



Figura 4.315 - Conector de bateria de fosfato ferroso de lítio. (Cedido por Hipowergroup, Anexo H)

4.1.7 Energia específica

Um indicador relevante, nos dita a quantidade de energia armazenada em um banco de baterias em razão do seu peso. Quanto menor for o peso do veículo utilizado, maior será a importância desse fator, visto que quanto maior o peso, maior será a inércia e a energia a ser gasta para impulsionar o veículo, e se o peso do veículo for pequeno as baterias terão, proporcionalmente, maior impacto. É desejável que esse valor seja o maior possível em qualquer tipo de operação.

4.1.8 Densidade energética

Essa variável nos exprime a quantidade de energia por volume. Como os veículos possuem espaço limitado em seu interior, algumas vezes muito limitado, é necessária a escolha de baterias que ocupam o menor espaço possível e que possuam formatos simples, que facilitem o aglomerado de várias baterias perto uma das outras.

4.1.9 Sustentabilidade

No estudo de sustentabilidade deve-se levar em consideração os elementos químicos utilizados na composição. Por exemplo, o propósito de uma empresa é produzir veículos elétricos em larga escala e deseja-se medir o efeito do uso de certo componente químico a longo prazo, precisa-se estudar as reservas mundiais do elemento e qual é a expectativa de uso de material nos próximos anos.

Analisando o Lítio, metal que se encontra em todas as baterias baseadas na configuração que leva o mesmo nome do metal, é possível perceber que essa não é uma das melhores opções para se utilizar em uma produção de larga escala no futuro. Em um estudo que visa

analisar a demanda de lítio entre 2010 e 2100 [39] concluiu-se que, caso o número de veículos elétricos no mundo cresça a uma taxa de 3% ao ano, necessitaríamos de até 20 milhões de toneladas de lítio ou aproximadamente 22% de todo o lítio que o nosso planeta possui para a fabricação de 600 milhões de unidades de veículos, o que é um pouco maior do que metade da frota atual de veículos a combustão no mundo [40]. Existiria a necessidade de um forte sistema de reciclagem de lítio, além de refinarias espalhadas mundo afora para possibilitar o uso desse tipo de célula.

Em contrapartida, as baterias Zebra utilizam sal, que possui elementos químicos abundantes em nosso ecossistema, a sua aquisição é simples e barata e muitos métodos de extração foram desenvolvidos ao longo dos anos. Segundo o instituto de sal, a produção mundial já ultrapassa 240 milhões de toneladas e as reservas do mundo seriam capazes de esculpir 5 continentes europeus em escala 1:1 [41]. Os oceanos contêm em média 2.7% de sal. É observável que o uso desse componente químico para fabricação em larga escala de baterias é viável e deveria ser estimulado mundo afora.

Por último, deve-se analisar a toxicidade e o uso de metais pesados na composição das baterias, para fins de reciclagem e também de armazenamento. As baterias de chumbo-ácido, por exemplo, possuem ácido sulfúrico em sua composição, bem como o uso de chumbo, um metal pesado contaminante. Ambos podem trazer sérios danos ao ambiente bem como para o ser humano, podendo o contato ser mortal com essas substâncias. Todos os fabricantes de baterias de chumbo são obrigados por lei a aceitar as suas baterias utilizadas e então encaminhá-las para uma forma de reciclagem apropriada

Utilizando novamente o caso das baterias Zebra, que possui em sua formulação os elementos níquel, cloro e sódio, seu descarte é muito mais simples e sem perigos, pois o contato tanto do ambiente como do ser humano com esses elementos não infere qualquer tipo de perigo ou necessidade de uma manipulação especial.

4.1.10 Segurança

Ao entrarmos em contato com um veículo elétrico existem três grandes perigos que devem sempre ser analisados e projetados com muito cuidado para evitar a ocorrência de acidentes: curtos-circuitos na área de potência, aumento de temperatura e choques elétricos.

Curtos-circuitos: Quando os terminais positivo e negativo de uma bateria são ligados diretamente dizemos que ela está curto-circuitada, um efeito indesejável para muitos tipos de baterias, podendo ocorrer por erro humano ou pane interna na célula. As baterias apresentam diferentes níveis de resistência quanto aos curtos-circuitos, sendo que as baterias de lítio possuem a menor resistência de todas e em alguns casos as baterias

explodem ou pegam fogo ao ocorrer esse problema, o que não é compatível para qualquer tipo de aplicação.

Aumento da temperatura: Devido ao efeito joule e outros processos que diminuem a eficiência de uma bateria, ocorre aumento de temperatura nas proximidades da mesma, efeito que pode ser desagradável ao corpo humano, observando que as baterias podem operar normalmente até 60 °C. Em alguns casos, por falta de ventilação essa temperatura pode ser ainda superior, por esses motivos é necessário vedar termicamente o banco de baterias de forma que o calor encontrado nesse local não se espalhe pelo veículo, de forma que o seu condutor e as demais pessoas que estejam utilizando-o não entrem em contato com esse calor.

As baterias Zebra, em especial, necessitam de um invólucro bem mais sofisticado, visto que a temperatura de operação das mesmas atinge os 270 °C.

Choques elétricos: As descargas elétricas criadas dentro de um veículo elétrico são nocivas ao contato humano, podendo causar danos irreversíveis. Proteções de borracha ao redor das baterias e em toda a linha de transmissão elétrica são necessárias para se evitar possíveis acidentes.

4.2 Motores

4.2.1 Eficiência

Quando falamos de eficiência de motores é necessário separar dois tópicos importantes a se analisar: a eficiência máxima que um motor é capaz de suprir e as situações em que a eficiência para tal sistema aumenta ou diminui.

Utilizando o caso dos motores de indução como exemplo, os valores comuns de eficiência chegam a um máximo de 90%, mas ele só é apresentável quando a velocidade de rotação está alta, mais próxima do seu valor máximo do que do mínimo. A figura 4.4 abaixo (baseada em [7]) exemplifica uma curva para esse tipo de motor:

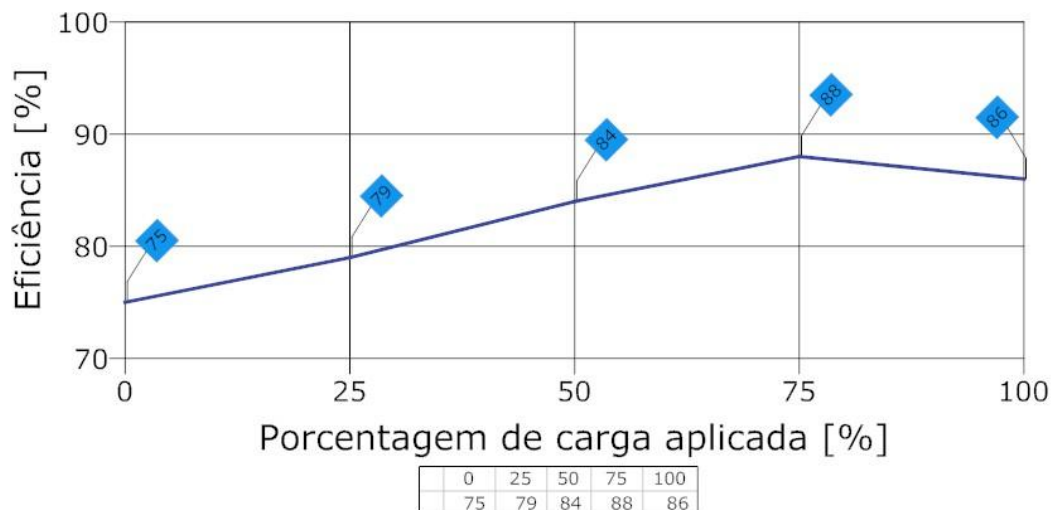


Figura 4.4: Eficiência do motor de acordo com a rotação.

Em contrapartida, os motores de corrente alternadas excitados por corrente contínua sem escovas apresentam eficiência de até 95% e apresentam grande eficiência em rotações mais baixas que os motores de indução trifásica. Abordar valores de eficiência condizentes com o requerido por um certo caso

Não se deve ignorar a faixa ótima de operação de um motor, o que implica em uma melhora de eficiência não somente de acordo com o seu valor absoluto máximo, mas também com o tipo de aplicação em questão.

4.2.2 Manutenção

O uso de escovas é um quesito que exige manutenção periódica em um motor, necessitando da presença de um técnico instruído na área de motores para realizar a troca das escovas antigas e usadas por novas. As duas tarefas adicionais de manutenção devem ser feitas em todos os tipos de motores: checagem dos terminais de alimentação e retirar a poeira acumulada tanto no controlador como no motor.

Caso o módulo de controle de um motor seja de um dos tipos simples, é possível também recorrer ao artifício da manutenção fora da empresa que o produziu, caso o desempenho do sistema esteja aquém do esperado.

4.2.3 Controle

Das qualidades a serem tratados nesse tópico, aquele que diz respeito à eficiência do controlador deve ser previamente avaliado do item "eficiência". O que podemos estimar então é o grau de complexidade do controlador e a possibilidade de manutenção.

Grau de complexidade: Controladores que apresentam vários módulos de controle (controle de velocidade, de torque, sensores, encoders, controle de transmissão dentre outros) tendem inevitavelmente a apresentar uma chance maior de erros, que podem se multiplicar pelo sistema e causar comportamentos não desejados. Alguns motores exigem o uso de

vários módulos diferentes para funcionar com sucesso, enquanto outros sequer precisam de um módulo de controle, podendo ser diretamente conectados a uma fonte, como é o caso dos motores de corrente direta ligados em série.

Uma análise apurada deve ser feita para que um balanceio entre a necessidade de um módulo do sistema e o aumento de eficiência seja possível.

Possibilidade de manutenção: Como já exposto no tópico anterior, caso o sistema de controle seja simples é possível executar a manutenção em um circuito de controle, não necessitando enviar a peça de volta para a fábrica que o produziu, economizando dessa maneira tempo e dinheiro.

4.2.4 Custo

Se o banco de baterias e seu respectivo controle possuem o maior custo dentre todos os subsistemas de um veículo elétrico, o motor, juntamente com seu modelo de controle, ocupa o segundo lugar em preço, ou um lugar próximo a esse. Obviamente, quanto maior a potência e torque do motor, mais caro ele será, torna-se essencial o cálculo de torque máximo necessário e de potência requerida pelo veículo, de forma a diminuir os gastos.

No caso de uso de controladores sofisticados, o preço dos mesmos pode chegar a ultrapassar o preço do motor em si. É preciso mensurar a necessidade de um controlador mais eficiente em contrapartida com o valor que isso acarretará para a quantia final. Abaixo se segue parte de um orçamento de um motor, identificado como PM18A e seu controlador, identificado como PMC18A que demonstra o caso do preço do controlador ser maior que o do motor. Abaixo a tabela 4.3 apresenta os preços desses equipamentos:

Tabela 4.3: Orçamento de motor PM18 e controlador PMC18A

Nº	Modelo	Descrição	Preço (\$)	Quantidade	Valor Final
1	PM18A	Motor elétrico	2.225	1	2.225
2	PMC18A	Controlador	2.228	1	2.228

4.2.5 Peso

Assim como no caso das baterias, existe certa influência no peso do motor e seu controlador no sistema final, contribuindo ou prejudicando com a autonomia final do sistema. Os motores de relutância, por exemplo, apresentam a menor massa de todos os motores apresentados, enquanto os motores de corrente direta são os mais pesados em relação aos outros.

4.3 Sinergia

Duas variáveis aqui apresentadas dependem diretamente da relação entre o módulo do motor e o módulo da bateria, por esse motivo foi criado esse terceiro ícone, que fala sobre a sinergia que deve existir entre esses dois sistemas.

4.3.1 Descarga Máxima Nominal

Ao descarregarmos a bateria, existe um valor máximo de corrente que podemos usufruir até a descarga total, essa constante também existe no motor e exibe o valor de corrente para o qual é possível se obter o torque nominal da máquina. Idealmente, o valor escolhido para a descarga máxima nominal deve ser o mesmo para esses dois equipamentos, ou pelo menos próximo um do outro. Em caso de se chegar a uma situação em que deve-se escolher qual aplicação apresentará uma variável de valor maior, escolher uma descarga máxima nominal para as baterias. Dessa forma, a eficiência do sistema será mantida, podendo apresentar até mesmo uma leve melhora.

Caso seja utilizado um valor de descarga máxima nominal no motor do que o utilizado nas baterias, pode ocorrer uma cobrança energética constantemente maior do que é possível de se gerar de forma segura nas baterias, tornando o ciclo de descarga fora do regime nominal, o qual só é suportado por alguns segundos.

4.3.2 Descarga Máxima

Essa corrente diz respeito à quantidade de corrente que as baterias podem alimentar o motor por um curto espaço de tempo, normalmente por 1 minuto ou menos. Novamente, como explicado no item anterior, caso seja necessário escolher qual sistema deve possuir um valor ligeiramente maior, escolher o sistema de baterias. O problema que aqui ocorre na hipótese de se utilizar o mais valor no motor é que não será possível de se adquirir o torque máximo que o motor é capaz de desenvolver, visto que a fonte de energia é incapaz de suprir a corrente necessária para se chegar nesse valor.

Definidas as estruturas de avaliação, precisamos considerar uma outra necessidade antes de partirmos para o estudo da metodologia: a inclusão de datasheets para cada tipo de bateria. Existe hoje uma diversidade muito grande de fabricantes e forma com que as baterias são fabricadas, criando uma variedade muito grande para um mesmo tipo de bateria e dificultando definir-se com mais exatidão o valor das variáveis com que se está trabalhando. Essa exigência não é tão imprescindível para os motores visto que a geometria, topologia de controle e outras variáveis importantes são muito similares entre produtos de diferentes empresas.

Os anexos de a até g que podem ser encontrados no final do documento contemplam os datasheets para cada uma das químicas de baterias encontradas nesse artigo. Para

simplificar a interpretação dos dados no futuro, são exibidos adiante os valores importantes que foram obtidos através dessa lista:

Tabela 4.4 - Principais valores datasheets bateria

Bateria	Ah	Tensão [V]	Wh/kg	Wh/L
Li-íon	1.15	3.7	120	300
Fosfato Ferroso de Lítio	50	3.2	84.6	110.8
Chumbo- Ácido	55	12	37.7	96.3
Polímero Lítio	4	11.1	103.5	177.6
Níquel Metal Hidreto	100	12	66	137
Níquel Cadmio	5	12	48.38	120
Zebra	76	263	117	164
Lítio – Manganês	1.1	3.8	93	244
Zinco ar	6.75	2.35	191	220

Tabela 4.5 - Principais valores datasheets bateria parte dois

Bateria	Temperatura de descarga [°C]	Ciclos	DOD [%]	C
Li-íon	-20 / 60	500	100	2
Fosfato Ferroso de Lítio	-20 / 60	2000	80	3
Chumbo- Ácido	-15 / 50	400	50	1/20
Polímero Lítio	-30 / 60	1000	100	2
Níquel Metal Hidreto	-20 / 40	2500	80	1.5
Níquel Cadmio	-30 / 60	500	100	1
Zebra	270 (mín)	1000	70	1
Lítio – Manganês	-20 / 60	1000	100	11

Tabela 4.5 (continuação) - Principais valores datasheets bateria parte dois

Zinco ar	0 / 50	500	80	1
----------	--------	-----	----	---

Definidos agora todos os parâmetros necessários, é possível iniciar a discussão sobre o método de otimização em si, que será baseado na explicação e uso de cada uma das variáveis aqui discutidas. Abaixo, na tabela 4.6, está o quadro resumo de todas as variáveis essenciais para determinação da rotina de otimização:

Tabela 4.6 - Parâmetros para determinação da rotina de otimização

Variáveis / Sistema	Bateria	Motor	Sinergia
1	Eficiência	Eficiência	Descarga máxima
2	Carga Máxima Nominal	Manutenção	Descarga máxima nominal
3	Custo	Controle	
4	Ciclos	Custo	
5	Profundidade de descarga (DOD)	Peso	
6	Energia específica (Wh/kg)		
7	Densidade energética (Wh/L)		
8	Manutenção		
9	Sustentabilidade		
10	Segurança		

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

Escolher a melhor combinação de motor-bateria envolve decidir quais fatores são mais importantes. Definir a importância de se ter um veículo leve, ou que requer baixo grau de manutenção ou ainda ocupar um volume reduzido são os fatores decisivos de quais variáveis terão maior ou menor peso na formulação do método.

Expondo essa questão, deve-se criar um algoritmo de otimização capaz de introduzir o grau de importância para cada uma das variáveis apresentadas. Apesar de complicado, podemos tentar julgar em um senso geral qual será a importância de cada um dos termos de uma forma absoluta, criando uma metodologia que aqui será chamada de método absoluto, tentando enquadrar o maior número de aplicações possíveis. Uma segunda forma de abordagem seria utilizar um estudo de caso, menos abrangente e capaz de influenciar nos pesos a ser atribuído cada um dos itens especificados de acordo com um certo tipo de aplicação. Para efeitos de comparação de resultados, os métodos serão apresentados e utilizados no processo de escolha.

Possuímos 17 termos a serem julgados em três categorias diferentes, itens que foram expostos na seção de matérias. Dessas variáveis, cinco fazem da escolha de motores, dez na parte de baterias e por fim dois na sinergia. O sistema adotado utilizará pesos para cada um desses termos, baseando em uma distribuição normal, que visa manter equilíbrio para um número grande de variáveis. Esse é o primeiro passo do algoritmo para manipular os dados de forma a se classificar baterias e motores em um gráfico com as notas obtidas. É obtida a seguinte distribuição de pesos acordo com essa metodologia:

Tabela 5.1 - Número de variáveis por categoria

Peso	Variáveis Baterias	Variáveis Motores	Variáveis Sinergia
4 (fundamental)	2	1	0
3 (necessário)	3	2	1
2 (útil)	3	1	1
1 (pouco influente)	2	1	0

Essa distribuição foi escolhida de forma a proporcionar uma variedade entre todos os pesos e mantendo a possibilidade de escolha em os mesmos. As notas para cada um dos quesitos podem variar de 1 a 5.

5.1 Método Absoluto

Definir parâmetros abrangentes e capazes de englobar o maior número de aplicações possíveis não é uma tarefa simples. Primeiro, é necessário analisar os principais modelos

que se encontram no mercado (a citar alguns que são Nissan Leaf, Mitsubishi iMiev, Tesla Roadster, Ford Focus Electric, Honda Fit EV, BMW ActiveE, dentre outros), outras aplicações viáveis (ônibus, tratores e trens) e filtrar a partir do material divulgado pela mídia e fabricantes quais fatores são considerados fundamentais, necessários, úteis e por fim pouco influentes.

Escolheu-se então os seguintes pesos para as variáveis:

Tabela 5.2 - Pesos das variáveis para o método absoluto

Baterias			
Peso 4	Peso 3	Peso 2	Peso 1
Custo	Segurança	Wh/L	Sustentabilidade
Eficiência	Carga Máxima Nominal	Ciclos	Manutenção
	Wh/kg	DOD	
Motores			
Peso 4	Peso 3	Peso 2	Peso 1
Custo	Eficiência	Peso	Manutenção
	Controle		
Sinergia			
	Descarga máxima	Descarga máxima nominal	

Precisamos agora definir os intervalos para cada uma das notas, de 1 à 5 para cada parâmetro apresentado. Para o caso das baterias, que apresentam datasheets contendo algumas das informações necessárias, as notas serão baseadas de acordo com os seguintes padrões:

- Nota 1: Todos especificados até o valor inferior + 10%
- Nota 5: Todos especificados até o valor superior -10%
- Notas 2,3 e 4: Intervalos cada um contendo a terça parte entre nota 5 e nota 1

Exemplo: O maior valor encontrado de energia específica (Wh/kg) é 300, o menor é 40. Recebem nota 5 valores acima ou igual a de $300 - 10\%$, ou seja, 270. Nota 1 vai para aqueles que estão abaixo ou igual a $40 + 10\%$, ou seja, valores abaixo de 44. A terça parte de $270 - 44$ é aproximadamente 75, assim temos nota 2 de 44 até 119, nota 3 de 119 até 194 e nota 4 de 194 a 269.

Para identificar valor superior, o sinal "+" será utilizado após o número apresentado. Já para identificar o valor inferior o sinal utilizado será o de "-". Ou seja, um valor que apresente o

número 80+ significa que se devem considerar os valores a partir de 80 e qualquer valor adiante do mesmo.

As tabelas de custo tanto de baterias como motores e também a tabela de peso e controle do motor são especiais, os valores utilizados estarão de acordo com aqueles apresentados em [4, 5, 24,26,27,28].

Não é possível avaliar os quesitos de sinergia no método absoluto, pois não existe uma definição de torque necessário e de corrente máxima por não se saber exatamente em que tipo de aplicação está se desenvolvendo. Essas variáveis foram então retiradas do cálculo de notas apresentado.

Tabela 5.3 - Valores para o método baseado em estudo de caso

Variáveis Baterias	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Eficiência [%]	87.3 +	87.3 / 73	73 / 58.7	58.7 / 44.4	44.4 -
Carga Máxima Nominal [C]	9+	9 / 6	6 / 3	3 / 0.055	0.055 -
Ciclos	1800+	1800 / 1350	1350 / 900	900 / 440	440-
DOD [%]	90+	90 / 78	78 / 67	67 / 55	55-
Sustentabilidade	Baseadas em Sal	Baseadas em Zinco	Baseadas em Chumbo	Baseadas em Lítio	Baseadas em Níquel
Segurança	Não possui metal	Possui metal leve	Possui metal pesado	Possui metal pesado tóxico	Possuem metais pesados e ácido
Manutenção	Não apresenta A,B ou C	A	B ou C	A e B, A e C ou B e C	A e B e C
Wh/kg	180+	180 / 131	131 / 82	82 / 33	33-
Wh/L	270+	270 / 210	210 / 150	150 / 90	90 -
Variáveis Motores	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Eficiência	84.5+	84.5 / 78	78 / 71.5	71.5 / 65	65-
Manutenção	Módulo simples e sem escovas	Modulo Comp. Sem escovas	Sem avaliação	Módulo simples e com escovas	Modulo Comp. Com escovas
Controle	T e V e S e Tq	T e V e Tq	T e V	T	nenhum

Legenda:

A: Os conectores não se ajustam muito bem às baterias

B: Exige circuito de balanceamento

C: Circuito de controle sofisticado

S: Sensores ou encoders

T: Controle de Transmissão

Tq: Controle de Torque

V: Controle de Velocidade

O método absoluto termina com essa definição de parâmetros, e para basear cada modelo de motor e bateria dentro das faixas de estudo utilizou-se um banco de dados, que apresenta em média 11 fontes para o caso das baterias ([4],[5],[6],[7],[8],anexos A-H, catálogos dos fabricantes) e 6 para os motores ([25],[26],[27], catálogos dos fabricantes) diferentes para inserir o valor médio de uma variável as exceções para esses valores são:

- Baterias Zebra, que possuem poucos revendedores (duas fontes);
- Motores de relutância chaveada, tecnologia ainda em fase de testes (duas fontes);
- A informação de manutenção, tanto para baterias quanto motores (quatro fontes - duas para baterias e duas para motores);
- A informação de sustentabilidade para baterias (uma única fonte);

A seguir inicia-se então a metodologia por estudo de caso analisando o projeto ciclar.

5.2 Metodologia por estudo de caso

Em primeiro lugar é necessário expor o estudo de caso e dele retirar as informações necessárias para categorizar as regiões das notas de 1 a 5. É possível que não se encontre todas as informações necessárias em alguns desses estudos, o uso do método absoluto torna-se necessário para completar as lacunas que existirão.

- **Estudo de caso: Projeto Ciclar**

Iniciativa criada em 2011 pela professora Dianne Vianna, trata-se de um projeto para a pesquisa, construção e testes de um veículo elétrico capaz de realizar a coleta seletiva ao redor do campus Darcy Ribeiro da universidade de Brasília. A equipe, que já contou com a presença de mais de trinta estudantes de oito engenharias diferentes e do curso de desenho industrial, e de vários professores, tem como desafio escolher todas as peças, dimensionar as estruturas, realizar cálculos e simulações de componentes, desenvolver arquiteturas de controle e administrar todas as partes operantes dentro da dinâmica de um veículo de carga elétrico.

Para nortear a forma como seriam feitas as escolhas de como esse veículo seria, alguns pontos iniciais foram escolhidos, que encabeçaram toda a parte inicial de pesquisa e dimensionamento do projeto, a ser:

- Carga a ser rebocada: 500 kg.
- Velocidade máxima de, pelo menos, 60 km/h.
- Capaz de trafegar em todo o campus e em suas pistas, com limites superior e inferior nas vias L3 norte e L4 norte, respectivamente.
- Preço total de, no máximo, R\$ 50.000,00.
- Veículo deve comportar dois passageiros.
- Peso do sistema descarregado menor que 800 kg (com dois passageiros de 70 kg cada).

Decidido os pontos iniciais que norteiam o projeto, os trabalhos de pesquisa e avaliação do mercado foram inaugurados e, por se tratar de um veículo elétrico, em certo momento tornou-se necessário definir diretrizes que iriam ser usadas como parâmetros na escolha de módulos de banco de baterias e motores elétricos a serem utilizados no veículo. Os principais pontos argumentados foram:

- Peso do módulo completo em torno de 200 kg.
- Preço inferior a R\$ 20.000,00.
- Dimensões o mais reduzidas possível.
- Vida útil das baterias de pelo menos 5 anos.
- Altura do motor e da bateria menor que 250 mm.
- Autonomia de cumprir a rotina necessária diária para coleta do campus.
- Tempo de recarga das baterias menor ou igual a 8 horas.
- Sistema seguro e sem riscos aos usuários.
- Mínimo de manutenção possível.
- Apelo sustentável forte.
- Área máxima ocupada pelo banco de baterias: 0.5 m².
- Volume máximo ocupado pelo banco de baterias: 125 l.
- Torque nominal: 78 N*m.
- Torque máximo: 156 N*m.
- Operação durante duas horas por dia.
- Energia de 10 kWh, considerando-se perdas e margem de segurança.
- Uso do veículo fixado em 5 vezes por semana.

Existem dois pontos do dimensionamento relevantes a se salientar: um diz respeito ao volume que pode ser ocupado pelas baterias no veículo e outro quanto à energia que é necessário para o veículo cumprir suas obrigações de coleta seletiva.

As baterias, no caso, ficarão no piso do veículo, passando entre o motorista e o carona e então estendendo-se até a dianteira. Abaixo uma figura capaz de criar uma imagem visual do espaço que as baterias podem ocupar dentro do veículo, e que juntamente com a informação de altura máxima proporciona a capacidade de se calcular o volume que as baterias podem ocupar no veículo.

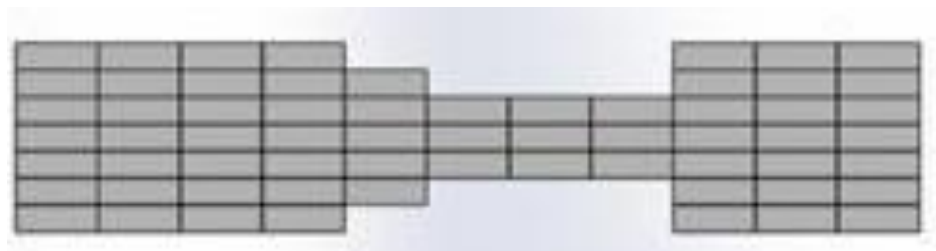


Figura 5.1 - Imagem do espaço que as baterias ocupam dentro do veículo Ciclar

Para o cálculo energético, uma rotina de testes teve de ser feita, utilizando como teste os pontos de coleta na UnB, um veículo cuja massa seria próximo a do veículo elétrico e um reboque, onde é inserida a carga de coleta. Utilizando-se de um sistema de GPS capaz de detalhar a velocidade aplicada dentro do veículo, podemos simular o gráfico a seguir, da velocidade desenvolvida pelo tempo, através de uma rotina de programação feita com o programa MATLAB.

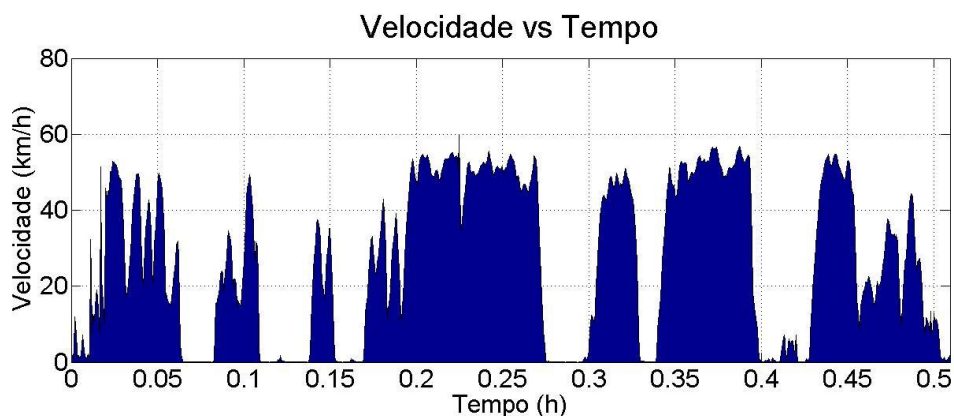


Figura 5.2 - Gráfico da velocidade desenvolvida pelo tempo da rotina de teste

Com os dados da velocidade, é possível integrar todos os pontos em relação ao tempo, chegando ao gráfico seguinte, que nos apresenta a informação da potência instantânea requerida em função do tempo.

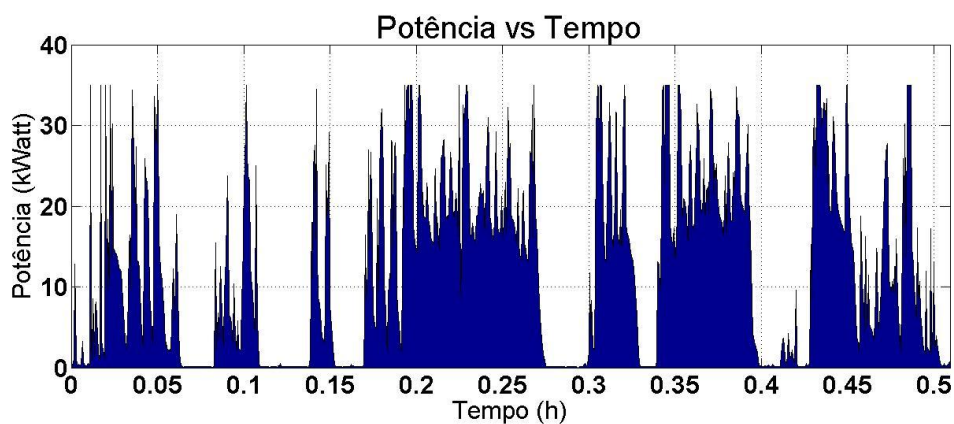


Figura 5.3 - Gráfico da função instantânea requerida em função do tempo

Somando todos os intervalos de potência chega-se ao valor energético necessário para que o veículo seja capaz de cumprir os trajetos determinados de coleta. No caso, esse valor encontrado foi de 6.5 kW de energia total. Aplicando a esse valor a eficiência do sistema e uma margem de segurança chega-se finalmente ao valor de 10 kW de energia requerida para a operação.

Com base nesses pontos defendidos pelo projeto, é possível agora chegar a uma tabela de pesos personalizada para os parâmetros do projeto, como apresentado a seguir:

Tabela 5.4 - Peso das variáveis método estudo de caso

Baterias			
Peso 4	Peso 3	Peso 2	Peso 1
Custo	Ciclos	Wh/L	Carga Máxima Nominal
Segurança	Sustentabilidade	Eficiência	DOD
	Manutenção	Wh/kg	
Motores			
Peso 4	Peso 3	Peso 2	Peso 1
Custo	Eficiência	Peso	Manutenção
	Controle		
Sinergia			
	Descarga máxima nominal	Descarga máxima	

As mudanças entre a metodologia absoluta e a utilizada em questão são essenciais para exibir como pode ser diferente a contagem de pesos e na parte dos resultados iremos descobrir qual a influência teremos na escolha do melhor conjunto de banco de baterias e motor para uma dada aplicação. A seguir a tabela com os valores discriminados em suas respectivas notas.

Tabela 5.5 - Valores para método baseado em estudo de caso

Variáveis Baterias	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Eficiência [%]	97+	95 / 97	92 / 95	85 / 92	85-
Carga Máxima Nominal [C]	1+	0.7 / 1	0.7 / 0.5	0.3 / 0.5	0.3-
Custo [R\$]	15.000-	R\$ 15.000 / R\$ 18.000	R\$ 18.000 / R\$ 25.000	R\$ 25.000 / R\$ 30.000	R\$ 30.000+
Ciclos	2000+	1500 - 2000	1250 - 1500	1000 – 1250	1000-
DOD [%]	80+	70 / 80	60 / 70	50 / 60	50 -
Sustentabilidade	Baseadas em Sal	Baseadas em Zinco	Baseadas em Chumbo	Baseadas em Lítio	Baseadas em Níquel
Segurança	Não possui metal	Possui metal leve	Possui metal pesado	Possui metal pesado tóxico	Possuem metais pesados e ácido
Manutenção	Não apresenta A,B ou C	A	B ou C	A e B, A e C ou B e C	A e B e C
Wh/kg	150+	100 / 150	80 / 100	60 / 80	60-
Wh/L	200+	150 / 200	100 / 150	75 / 100	75+
Variáveis Motores	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Eficiência	84.5+	84.5 / 78	78 / 71.5	71.5 / 65	65-
Manutenção	Módulo simples e sem escovas	Modulo Comp. Sem escovas	Sem avaliação	Módulo simples e com escovas	Modulo Comp. Com escovas
Controle	T e V e S e Tq	T e V e Tq	T e V	T	nenhum

Tabela 5.5 (continuação) - Valores para método baseado em estudo de caso

Custo [R\$]	7.000-	7.000 / 9.000	9.000 / 12.000	12.000 / 15.000	15.000+
Peso [kg]	50-	50 / 60	60 / 70	70 / 80	80+
Variáveis Sinergia	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Descarga máxima	Valores idênticos	Diferença de 10%	Diferença de 20%	Diferença de 30%	Diferença maior que 30%
Descarga máxima nominal	Valores idênticos	Diferença de 10%	Diferença de 20%	Diferença de 30%	Diferença maior que 30%

Legenda:

A: Os conectores não se ajustam muito bem às baterias

B: Exige circuito de balanceamento

C: Circuito de controle sofisticado

S: Sensores ou enconders

T: Controle de Transmissão

Tq: Controle de Torque

V: Controle de Velocidade

- **Estudo de caso hipotético: Projeto ônibus econômico**

Pode-se utilizar o método de estudo de caso para prever o melhor conjunto de motor-bateria para situações hipotéticas, desde que sejam definidas de forma coerente premissas capazes de influenciar na escolha dos diferentes modelos. Podemos considerar o caso de um engenheiro que deseja lançar um projeto de ônibus elétrico a ser utilizado na copa de 2014 e para tal é desejável que esse veículo possua:

- Custo muito baixo
- Manutenção baixa
- Sustentável - um fator diferencial e que pode trazer influência na mídia

Além disso, existem alguns fatores de baixa influência para o ônibus, que fazem com que todas as baterias ganhem a mesma pontuação de valor cinco. São elas:

- Espaço
- Peso
- Ciclos

De acordo com esses dados, podemos montar a tabela 5.6, com os pesos apropriados de cada uma das variáveis e a tabela 5.7, contendo as faixas de valores:

Tabela 5.4 - Peso das variáveis método estudo de caso

Baterias			
Peso 4	Peso 3	Peso 2	Peso 1
Custo	Segurança	Ciclos	Wh/kg
Manutenção	Sustentabilidade	Eficiência	Wh/L
	Carga Máxima Nominal	DOD	
Motores			
Peso 4	Peso 3	Peso 2	Peso 1
Custo	Eficiência	Manutenção	Peso
	Manutenção	Controle	

Tabela 5.6 (continuação) - Valores para método baseado em estudo de caso

Variáveis Baterias	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Eficiência [%]	85+	85/80	80/75	75/70	70-
Carga Máxima Nominal [C]	1+	0.5/1	0.5/0.25	0.25/0.125	0.125-
Custo [R\$]	15.000-	R\$ 15.000 / R\$ 18.000	R\$ 18.000 / R\$ 25.000	R\$ 25.000 / R\$ 30.000	R\$ 30.000+
Ciclos	TODAS	NA	NA	NA	NA
DOD [%]	TODAS	NA	NA	NA	NA
Sustentabilidade	Baseadas em Sal	Baseadas em Zinco	Baseadas em Chumbo	Baseadas em Lítio	Baseadas em Níquel

Tabela 5.6 (continuação) - Valores para método baseado em estudo de caso

Segurança	Não possui metal	Possui metal leve	Possui metal pesado	Possui metal pesado tóxico	Possuem metais pesados e ácido
Manutenção	Não apresenta A,B ou C	A	B ou C	A e B, A e C ou B e C	A e B e C
Wh/kg	TODAS	NA	NA	NA	NA
Wh/L	TODAS	NA	NA	NA	NA
Variáveis Motores	Nota 5	Nota 4	Nota 3	Nota 2	Nota 1
Eficiência	80+	80/75	75/70	70/65	65-
Manutenção	Módulo simples e sem escovas	Modulo Comp. Sem escovas	Sem avaliação	Módulo simples e com escovas	Modulo Comp. Com escovas
Controle	T e V e S e Tq	T e V e Tq	T e V	T	nenhum
Custo [R\$]	7.000-	7.000 / 9.000	9.000 / 12.000	12.000 / 15.000	15.000+
Peso [kg]	TODAS	NA	NA	NA	NA

Legenda:

A: Os conectores não se ajustam muito bem às baterias

B: Exige circuito de balanceamento

C: Circuito de controle sofisticado

S: Sensores ou enconders

T: Controle de Transmissão

Tq: Controle de Torque

V: Controle de Velocidade

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISE

6.1. Valor absoluto

Em primeiro lugar são mostradas as tabelas que denotam as notas alcançadas por cada motor e bateria. Pode-se aplicar a equação (x) para normalizar todos os valores para uma escala de 0 a 10:

$$Nota = \frac{\sum_{i=1}^j (N_i * P_i)}{\sum_{i=1}^j P_i} * 2 \quad (39)$$

N_i = Nota recebida pelo quesito

P_i = Peso do quesito

j = Número de diferentes tipos avaliados

A tabela de notas para as baterias utilizando o método absoluto, bem como os gráficos de avaliação são encontrados à seguir.

Tabela 6.1 - Notas das baterias utilizando o método absoluto

Quesitos	PbSO ₄	NiCd	NiMH	Zebra	Li- íon	Lypo	Li- Mn	LiFePO ₄	Zn-ar
Custo	5	4	2	5	1	2	2	3	5
Eficiencia	1	2	3	4	4	5	4	5	1
Segurança	1	3	3	5	4	4	3	3	2
Carga máxima nominal	1	2	2	2	2	2	5	2	2
Wh/kg	1	2	3	3	3	3	3	3	5
Wh/L	1	2	2	4	5	3	4	2	4
Ciclos	1	2	5	3	2	3	3	5	2
DOD	1	5	4	4	5	5	5	4	4
Sustentabilidade	3	1	1	5	2	2	2	2	4
Manutenção	5	4	3	1	1	1	2	1	1

Utilizando a equação acima descrita e o programa feito em Excel, que se encontra no anexo J, com os dados de cada uma das baterias chega-se à nota final para cada uma das baterias estudadas.

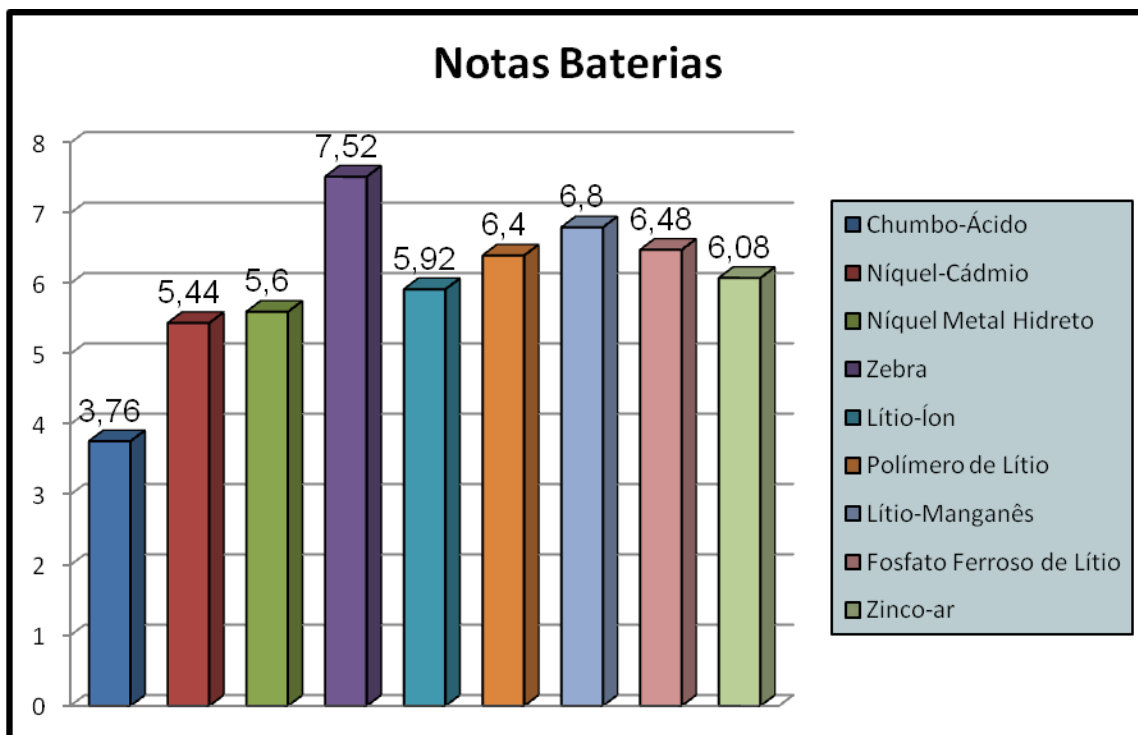


Figura 6.1: Nota das baterias método absoluto.

A nota média foi de aproximadamente 6, com as baterias do tipo Zebra apresentando o melhor desempenho, de acordo com as variáveis escolhidas, com uma boa diferença de pontuação para as baterias baseadas em lítio e as de zinco-ar. Com os piores resultados, as baterias de Chumbo-Ácido e baseadas em níquel ficaram abaixo da média. É válido comentar sobre as baterias de Chumbo-Ácido, cujo preço não pode ser superado por nenhuma das outras baterias, apresentou o pior resultado por ter um desempenho muito baixo em quase todos os demais quesitos.

Em um estudo sobre os principais fabricantes de veículos elétricos no mundo, podemos concluir que as tecnologias mais utilizadas são aquelas baseadas em lítio-íon, ao invés da primeira colocada do método encontra, que foram as baterias Zebra. Apesar de soar como uma falha no modelo apresentado, esse efeito é causado por algumas das maiores desvantagens dos veículos movidos à base de sal líquido: a necessidade de se manter o banco de baterias aquecido mesmo quando elas não se encontram em funcionamento e de demorar cerca de 24 horas para que seja possível ligar as baterias a partir do seu estado de repouso. Porém, como esse método deve tentar englobar o maior número de operações possíveis, nenhuma bateria foi descartada no cálculo. Na parte de análise dos resultados é apresentada uma fórmula simples de como tratar as desvantagens essenciais de cada tipo de bateria e como devem ser analisados esses defeitos a título de exclusão do tipo de bateria da avaliação final a ser julgada.

A próxima avaliação diz respeito aos motores e suas características. Como no caso das baterias, apresenta-se agora a tabela X com as notas adquiridas em cada uma das

tecnologias dos motores e logo em seguida um gráfico que mostra o desempenho alcançado por cada motor utilizando a metodologia absoluta.

Tabela 6.2 - Notas dos motores utilizando o método absoluto

Quesitos	Motor DC	BLPMDC	MIT	SPB	SRM
Eficiência	2	5	4	4	4
Manutenção	2	4	4	1	5
Controle	5	4	4	4	3
Custo	5	2	3	3	4
Peso	2	4	4	3	5

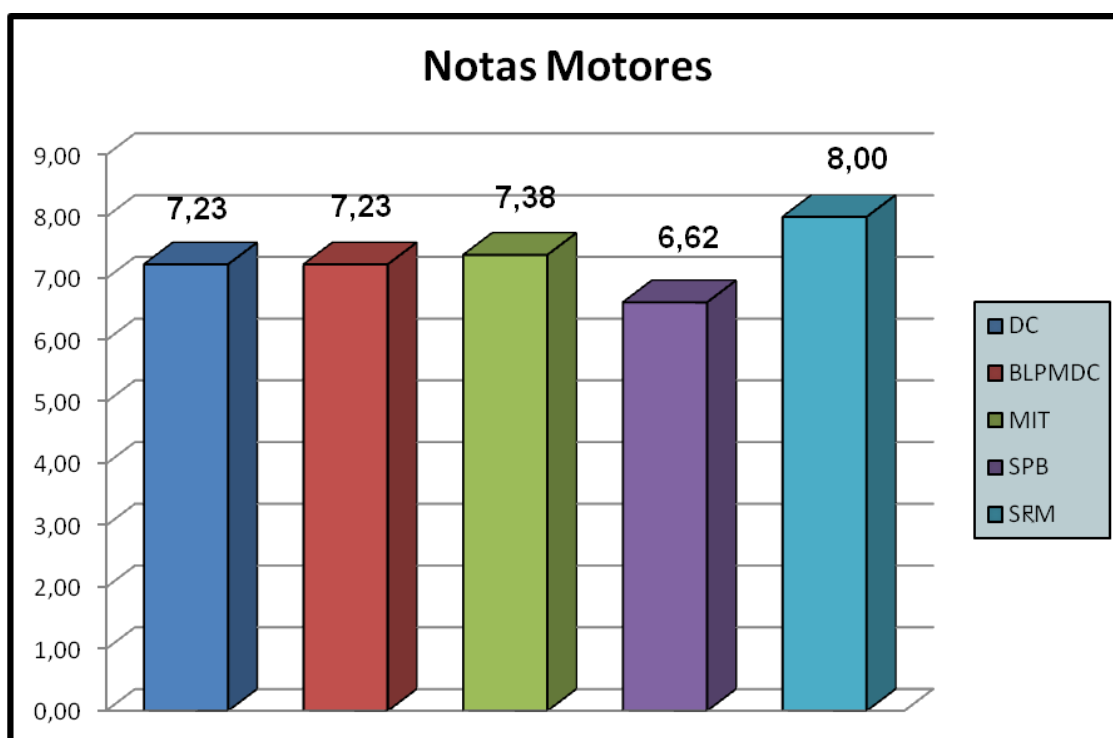


Figura 6.2: Nota motores utilizando método absoluto.

As notas finais, para o caso dos motores, tiveram uma variação menor se comparado com as baterias. A média alcançada foi de aproximadamente 7,29 e houve um empate pelo terceiro lugar, entre os motores de corrente direta e os de imã permanente sem escovas excitados por fonte de corrente direta. O melhor desempenho, alcançado pelos motores de relutância chaveados, ocorreu pelo fato de que esse motor obteve ótimas notas em todos os quesitos, possuindo somente uma nota com o valor três e todas as demais com valor superior. Como ainda é uma tecnologia muito nova que recentemente saiu do ramo da pesquisa para a parte de implementação, ainda não é observados no mercado muitos modelos desse tipo. Vários fabricantes, porém, já afirmaram o interesse de implementar seus modelos de veículos elétricos com essa tecnologia.

Os motores de corrente contínua, de indução trifásica e de imã permanente sem escovas obtiveram praticamente a mesma nota, e esses são os principais modelos encontrados no

mercado atual. A baixa eficiência dos motores de corrente direta é compensado pelo seu baixo custo e controle simples. Uma pequena diferença obtida a favor dos motores de indução, que possui um preço mais acessível que os motores de imã permanente sem escovas e maior eficiência do que os motores de corrente direta.

Em último lugar, os motores síncronos com escovas apresentam dificuldade para se manter em competição no mercado devido a exigência de um controle sofisticado e de necessitar de certa manutenção devido às escovas que possui. Apesar de alguns modelos de veículos ainda utilizarem esse tipo de tecnologia, caso não haja uma melhora na forma como o driver de controle deve ser feito dificilmente esse tipo de motor perdurará no mercado. Uma forma de controle que indicaria uma melhoria seria a não necessidade de utilizar sensores para realimentação dos controladores.

6.2. Estudo de caso

• PROJETO CICLAR

Assim como no método absoluto, começa-se apresentando a tabela de notas adquiridas pelas baterias, que também deve utilizar a equação X apresentada no começo do capítulo para o cálculo das notas finais. As comparações entre as metodologias serão feitas no subcapítulo seguinte.

Tabela 6.3 - Notas das baterias utilizando o método estudo de caso

Quesitos	PbSO ₄	NiCd	NiMH	Zebra	Li- íon	Lypo	Li- Mn	LiFePO ₄	Zn-ar
Custo	5	4	2	5	1	2	2	3	5
Eficiencia	1	2	3	4	4	5	4	5	1
Segurança	1	3	3	5	4	4	3	3	2
Carga máxima nominal	1	4	5	5	5	5	5	5	4
Wh/kg	1	2	3	4	4	4	3	3	5
Wh/L	2	3	3	4	5	4	5	3	5
Ciclos	1	2	5	3	2	3	3	5	2
DOD	2	5	5	4	5	5	5	5	5
Sustentabilidade	3	1	1	5	2	2	2	2	4
Manutenção	5	4	3	1	1	1	2	1	1

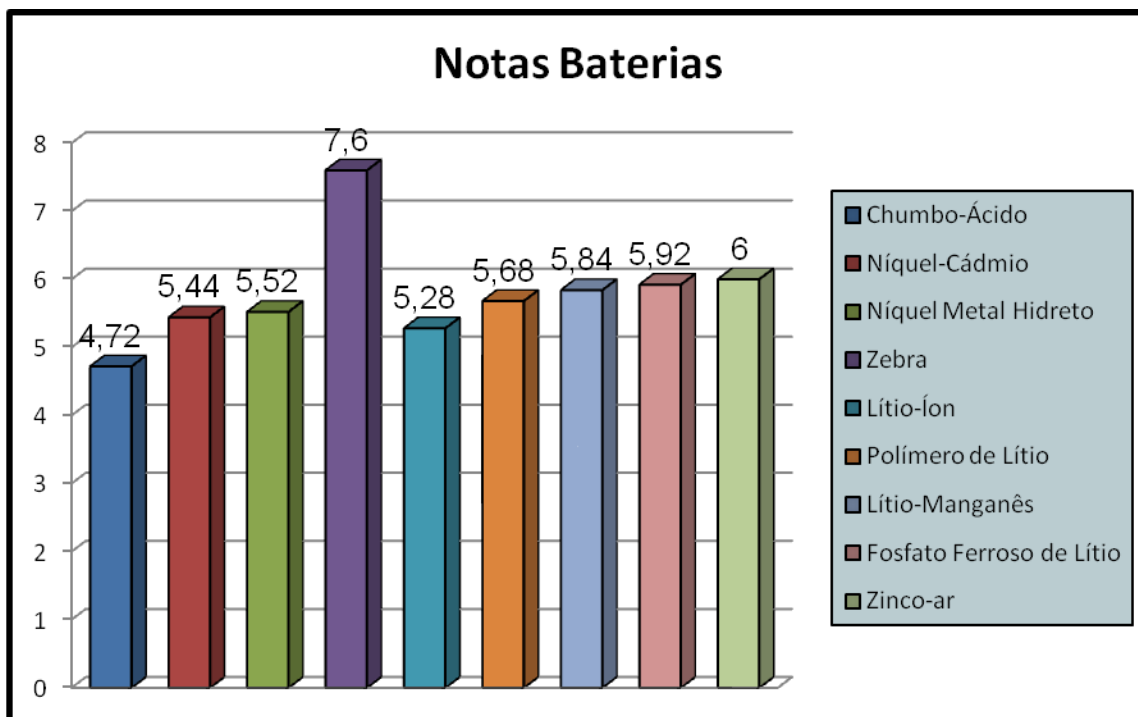


Figura 6.3: Nota das baterias utilizando o método estudo de caso.

Média de pontuação de aproximadamente 5,78, a metodologia baseada no estudo de caso do projeto ciclar apresentou quatro baterias acima da média: zebra, zinco ar e fosfato ferroso de lítio e lítio-manganês. É importante a ressalva de que as baterias adquiridas pelo projeto ciclar encontram-se entre uma dessas três categorias principais aqui citadas, a ser as baterias baseadas em fosfato ferroso de lítio.

A diferença das notas efetivas entre as baterias encontradas abaixo da média é muito pequena, com a exceção da bateria de chumbo-ácido, que apresentou um resultado maior que meio ponto inferior às demais. Novamente, como descrito no resultado do método absoluto, a possível não escolha das baterias zebra no projeto ciclar deve-se ao fato das desvantagens apresentadas por essa tecnologia.

Partindo para a avaliação de motores de acordo com os quesitos escolhidos, apresenta-se a seguir a tabela de notas encontrada para cada tipo de motor acompanhado pelo gráfico representativo da pontuação alcançado por cada tipo de tecnologia avaliada pela metodologia em questão.

Tabela 6.4 - Notas dos motores utilizando o método estudo de caso.

Quesitos	Motor DC	BLPMDC	MIT	SPB	SRM
Eficiência	2	5	3	3	4
Manutenção	2	4	4	1	5
Controle	5	4	4	4	3
Custo	5	3	3	3	4
Peso	2	4	4	3	4

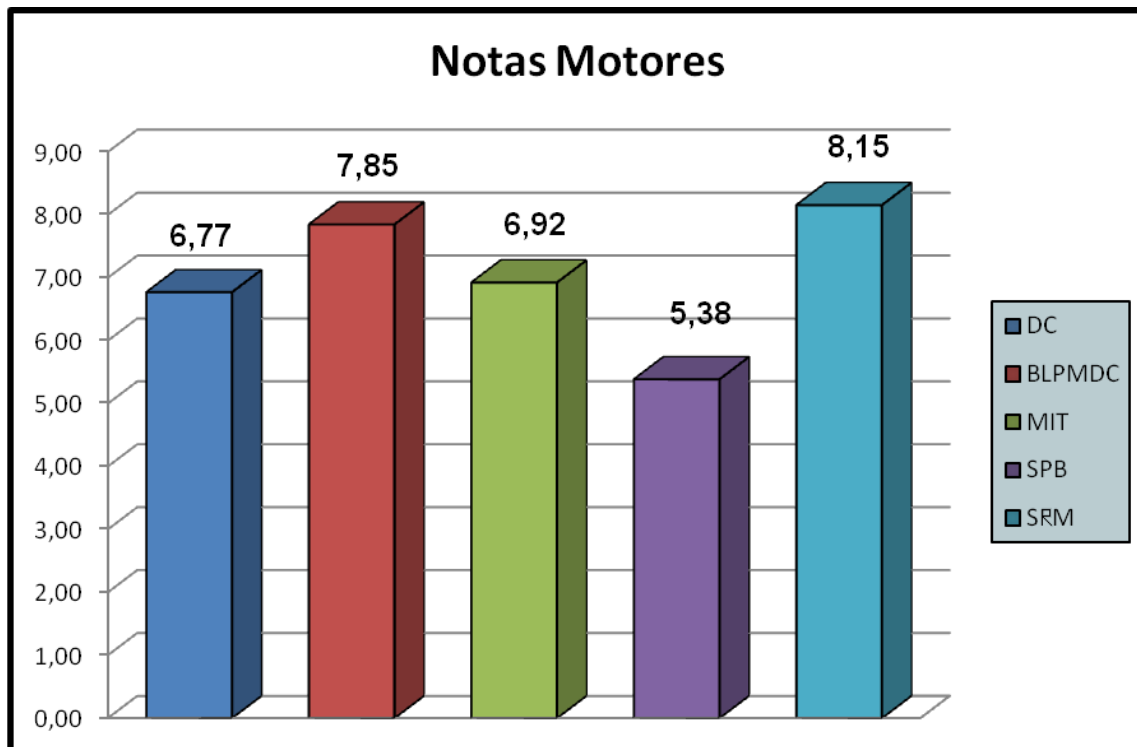


Figura 6.4: Nota motores utilizando método estudo de caso.

Com uma nota média de aproximadamente 7,02, é observável uma clara diferença que divide os tipos de motores em duas classificações: os dois motores acima da média apresentam rendimento significativamente maior que os demais tipos ficando a cerca de 1 ponto ou mais dos outros colocados.

Uma leve vantagem para os motores de relutância chaveadas sobre os motores de imã permanente sem escovas, apesar de apresentarem a mesma combinação de notas (uma nota 5, três notas 4 e uma nota 3) com a diferença de que os pesos escolhidos influenciaram as colocações desses motores.

Os motores de indução trifásica e de corrente direta apresentam desempenho semelhante, tornando-se ótimas alternativas no caso de impossibilidade de se utilizar os motores que ficaram nas primeiras colocações. Com uma nota ligeiramente superior a 5, os motores síncronos com escovas obtiveram o pior resultado de todos e deve ser somente considerado caso não haja nenhuma outra alternativa viável de se utilizar um tipo de motor diferente.

• ESTUDO DE CASO ÔNIBUS ELÉTRICO

Utilizando agora o caso hipotético do ônibus elétrico temos as tabelas de resultados de bateria e motor abaixo:

Tabela 6.5 - Notas das baterias utilizando o método estudo de caso hipotético.

Quesitos	PbSO ₄	NiCd	NiMH	Zebra	Li-ion	Lypo	Li-Mn	LiFePO ₄	Zn-ar
Custo	5	2	1	3	1	1	1	2	4
Eficiencia	3	3	4	4	4	5	4	5	2
Segurança	1	3	3	5	4	4	3	3	2
Carga máxima nominal	3	4	5	4	5	5	5	5	4
Wh/kg	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Wh/L	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ciclos	5	5	5	5	5	5	5	5	5
DOD	4	5	5	4	5	5	5	5	5
Sustentabilidade	3	1	1	5	2	2	2	2	4
Manutenção	5	4	3	1	1	1	2	1	1

Tabela 6.6 - Notas dos motores utilizando o método estudo de caso hipotético.

Quesitos	Motor DC	BLPMDC	MIT	SPB	SRM
Eficiência	4	5	5	5	5
Manutenção	2	4	4	1	5
Controle	5	4	4	4	3
Custo	5	2	2	2	3
Peso	5	5	5	5	5

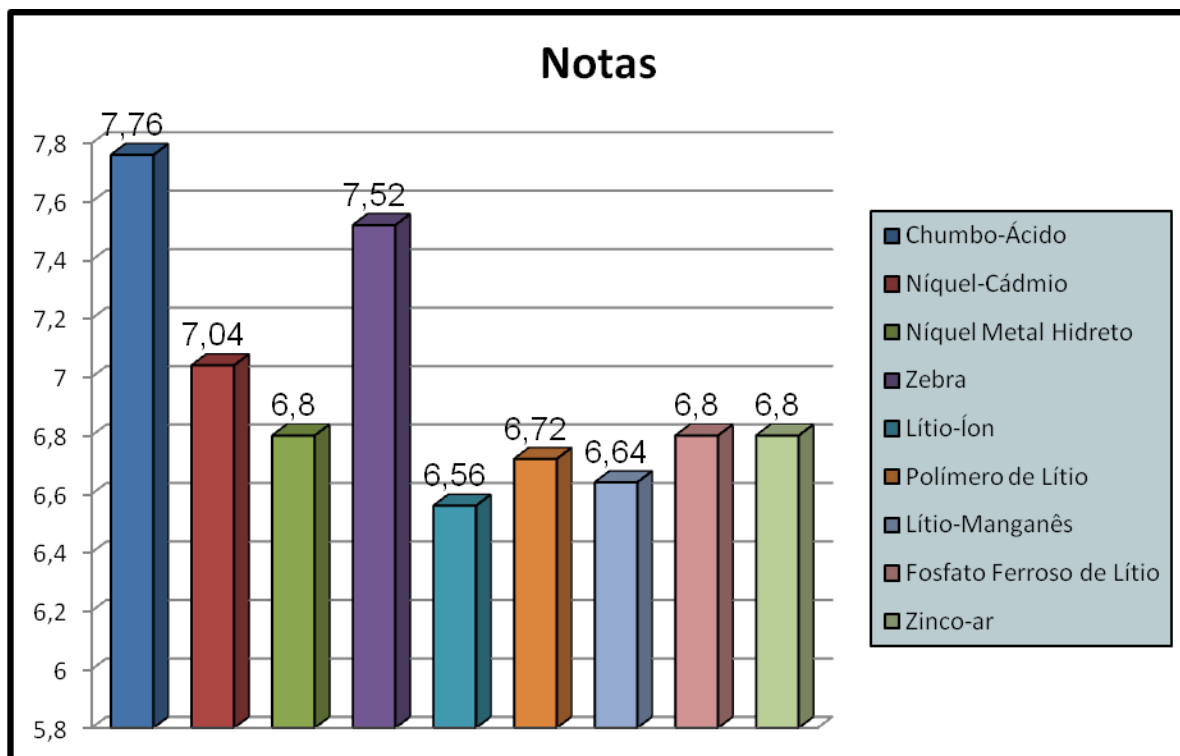


Figura 6.5 Nota das baterias utilizando o método estudo de caso hipotético.

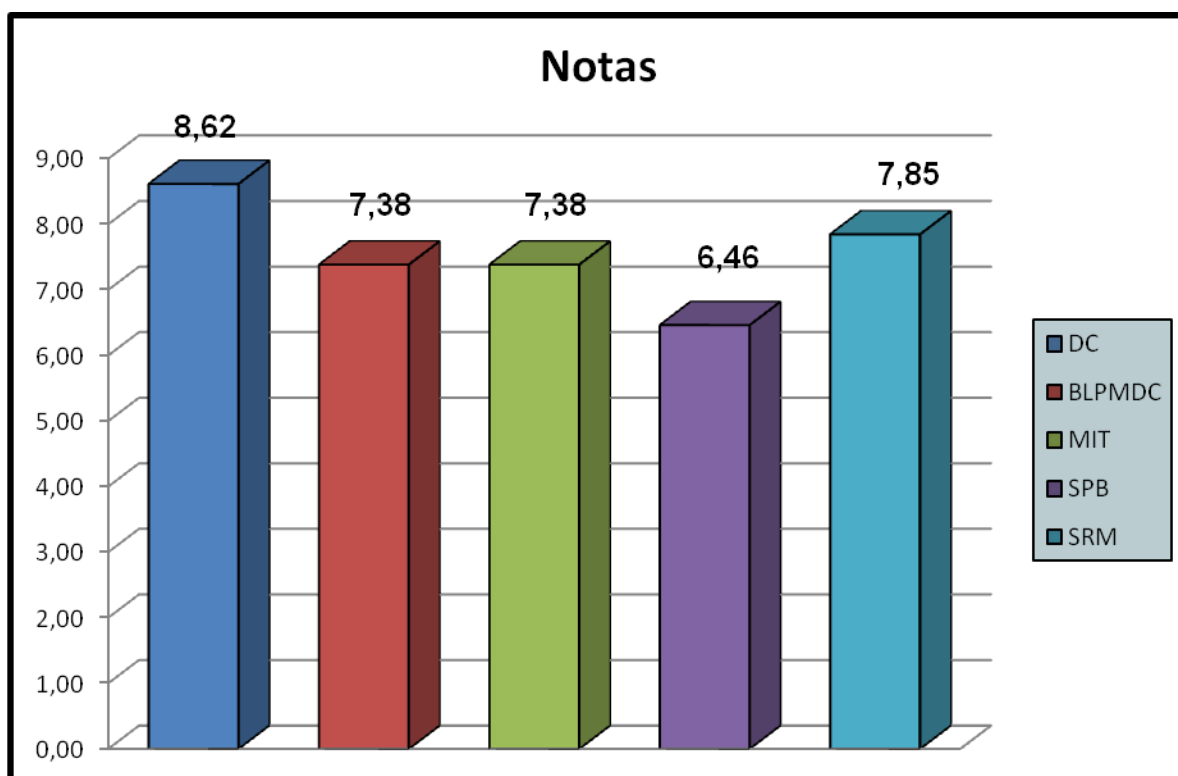


Figura 6.6: Nota motores utilizando método estudo de caso hipotético.

Esses resultados nos mostram a versatilidade do método e como não existe um modelo que é sempre melhor que outro para motores e baterias no mercado. Tudo depende do tipo de aplicação desejada e do que é importante quanto às variáveis para se escolher. Nesse caso, os últimos colocados nos outros dois exemplos estudados ficaram em primeiro lugar - as

baterias de chumbo-ácido e o motor de corrente contínua, o que não é uma surpresa visto as escolhas tomadas no momento de definir os pesos das variáveis.

6.3. Comparação entre metodologias absoluta e estudo de caso - CICLAR

Seguindo uma simples equação de subtração entre os valores das notas para cada uma das baterias no método de estudo de caso diminuídas das notas obtidas pelo método absoluto, é possível comparar os efeitos das mudanças de pesos e das faixas de quesitos para certas notas, que podem ser encontrados no gráfico a seguir.

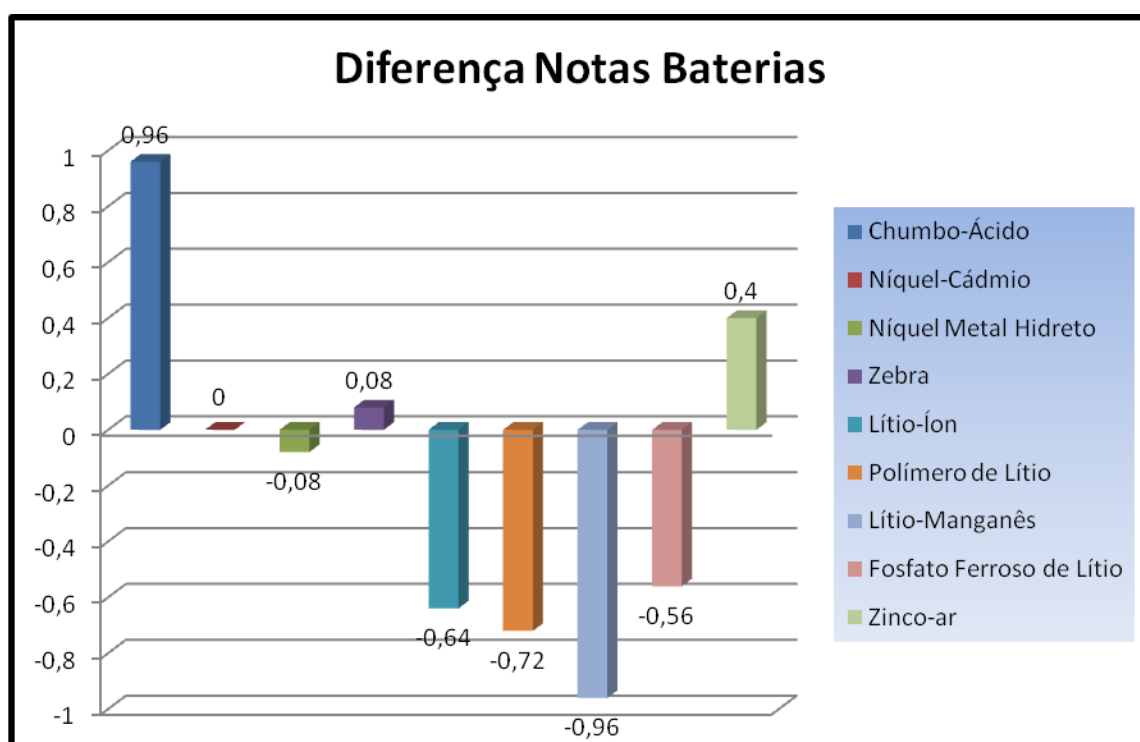


Figura 6.7: Comparação entre métodos para baterias.

Apesar da drástica melhora na pontuação das baterias de chumbo-ácido, as mesmas sequer alcançaram nota 5 pelo método do estudo de caso, porém sua viabilidade aumentou consideravelmente. Outro aumento substancial foi quanto as baterias de zinco ar, que pulou quatro posições com o aumento de 0,4 ponto, tornando-se a segunda melhor opção de escolha para o método de estudo de caso.

As baterias baseadas em níquel e a zebra praticamente não sofreram alteração, o que acarretou em uma vantagem sólida das baterias zebra em relação às demais baterias e uma aproximação das baterias baseadas em níquel daquelas baseadas em Lítio, visto que essas últimas tiveram uma perda de mais de meio ponto cada (destaque para as baterias de lítio-manganês, que quase chegaram a cair um ponto).

Apesar da grande queda das baterias de lítio, suas notas encontram-se entre mediana e alta, sendo uma ótima opção caso as baterias de zinco ar e zebra venham a ser desclassificadas futuramente na avaliação de fragilidades de tecnologias.

Seguimos agora com a comparação dos motores, utilizando o mesmo método de subtração realizado para as baterias. O gráfico de diferenças para as diferentes topologias é apresentado logo abaixo.

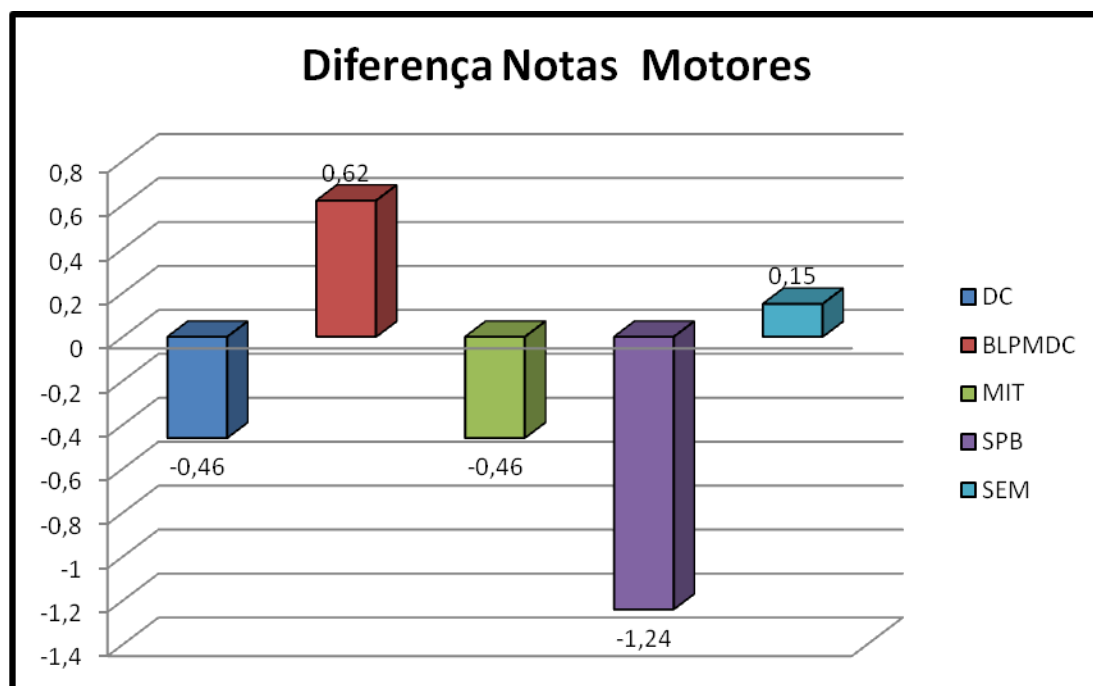


Figura 6.8: Comparação entre métodos para motores.

A variação no caso é mais visível que no caso das baterias, com grande melhoria dos motores de ímã permanente sem escovas e uma pequena melhoria dos motores de relutância chaveada. Os demais motores tiveram uma baixa na nota de tal forma que, para a aplicação no projeto ciclar, tornaram-se opções secundárias.

6.4. Eliminação de candidatos utilizando parâmetros de desvantagens

Um aspecto importante a ser ponderado é quanto ao fator determinístico de desvantagens quanto à classificação ou não de uma tecnologia para avaliação de um método. Esse tópico é apresentado após a mostra de resultados com o objetivo de primeiro comparar as notas encontradas para cada tipo de motor e bateria sem exclusão prévia, permitindo confrontar com todos os possíveis valores dentro das tipologias analisadas.

Existem algumas características que são vitais para certos tipos de aplicações, que acabam por inviabilizar algumas opções que foram estudadas para se utilizar em um veículo elétrico. É válido lembrar que todas as fragilidades apresentadas pelos modelos encontram-se na

revisão bibliográfica, e que nessa parte do documento irão ser frisadas aquelas que somente inibem o seu uso.

6.4.1 Baterias

6.4.1.1 Chumbo-Ácido

Existem três fatores que devem ser levados em consideração para avaliação nessas baterias, capazes de eliminá-las em algumas aplicações. O primeiro deles diz respeito às baterias de chumbo-ácido inundadas. Como o seu recipiente não é selado, aplicações que apresentam alto grau de vibração e onde é necessário utilizar as baterias em uma posição diferente da qual elas são projetadas para trabalhar, eletrólitos em paralelo com um eixo vertical e com saídas superiores, o líquido que constitui o eletrólito da mesma, a ser ácido sulfúrico, pode ser derramado nas proximidades, causando danos tanto nas baterias como em outros objetos ou pessoas que estiverem contíguos.

O segundo fator determinante diz respeito à energia específica. Seu valor muito baixo acaba por aumentar substancialmente o peso necessário para certa operação. Certos trabalhos [zinco-ar] ilustram bancos de baterias com quase 300 kg de peso, exibindo dessa maneira uma importância muito grande no peso final de um veículo, por exemplo. O último dos fatores é a densidade energética. As baterias, além de serem muito pesadas também necessitam de muito espaço por terem a densidade energética baixa, o que impossibilita o seu uso caso o espaço seja um delimitador.

Resumindo, temos:

Fatores desclassificatórios:

- Espaço.
- Peso.
- Eficiência.
- Vibração e posição das baterias, caso sejam inundadas.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Veículos de passeio pequenos, para duas pessoas.
- Veículos que exijam alta eficiência, e por isso requerem um peso reduzido.

6.4.1.2 Níquel Cádmio

O fator de maior influência para esse caso é o efeito de memória, que pode arruinar o rendimento de um veículo por diminuir a uma taxa muito rápida a tensão de operação. Resolver esse problema é complicado, pela necessidade de sempre se descarregar 80% das baterias antes de utilizá-las novamente, um contratempo capaz de excluir esse modelo de um número muito grande de operações. Analisemos como exemplo um veículo de passeio que se utiliza dessa matriz. Se a autonomia das baterias é avaliada em 20 km e a

pessoa percorreu em um certo trajeto somente 15 km, é necessário que antes de se recarregar as baterias ocorra uma nova utilização do veículo no valor exato de 5 km, o que pode ser bastante inconveniente para um condutor comum.

Outros fatores dizem respeito ao mesmo problema apresentado pelas baterias de chumbo-ácido: peso e volume ocupado pelas baterias. Apesar de apresentarem valores relativamente melhores para a densidade energética e energia específica, esses valores continuam em uma faixa perigosamente baixa, podendo desclassificar esse modelo.

Um último ponto a ser citado é quanto à alto-descarga. O valor de 20% mensal é muito alto, o que pode acarretar em danos permanentes caso as baterias sejam armazenadas por muito tempo sem uso.

Fatores desclassificatórios

- Percursos de utilização não regulares.
- Peso.
- Volume.
- Períodos longos sem utilização.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Carrinho de golfe elétrico.
- Veículo de passeio padrão.

6.4.1.3 Níquel Metal Hidreto

Assim como as baterias de níquel cádmio, a auto descarga dessa matriz é muito alta, chegando a valores de 30%, o que descarta a sua possibilidade de uso em aplicações onde o tempo de armazenagem é alto. Um segundo contratempo válido de ser ressaltado é quanto a sua temperatura de operação de carga, que varia de 0 a 30 °C, uma faixa muito curta com uma temperatura máxima muito baixa, que pode acarretar em danos se utilizados em locais de temperaturas superiores a essa.

Fatores desclassificatórios

- Períodos longos sem utilização.
- Região tropical ou onde a temperatura do ambiente é muito alta.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Carrinhos de minas de carvão, onde a temperatura é mais alta.
- Veículo de férias, utilizado de seis em seis meses.

6.4.1.4 Zebra

Todas as fragilidades nesse caso são resumidas à temperatura de operação; de 270 a 350°C, as baterias zebra exigem uma manutenção constante dessa exorbitante condição

para seu bom funcionamento, inferindo que, quando não está em utilização, deve estar ligada à rede elétrica para realizar a manutenção desse estado, acarretando em uma parcela de gasto energético superior aos demais modelos. Além disso, no processo de se ativar as baterias para uso a partir do seu estado de repouso, são necessárias ao menos doze horas de espera; um tempo que muitas vezes não se dispõe.

Fatores desclassificatórios

- Períodos longos sem utilização.
- Gasto energético. Necessidade de estar sempre ligado à alimentação elétrica quando não está em uso.
- Operações sem uma definição de cronograma temporal de uso e que necessitam de serviços imediatos.

Exemplos de aplicação que desclassificaria essa bateria:

- Veículos de trabalho, utilizados somente cinco dias na semana ou menos.

6.4.1.5 Baterias baseadas em lítio

Apesar das diferenças estruturais e de valores para variáveis, os comportamentos tidos como fragilidades das baterias de lítio são comuns a todas elas. O mais grave deve-se a sua baixa tolerância à curtos-circuitos, que podem ocasionar situações não desejáveis como as já exemplificadas na revisão bibliografia explosões e incêndios. A exigência de um controle fino faz-se presente nessas topologias visando o reparo deste problema, porém algumas vezes, mesmo com controle robusto, pode haver falhas no sistema de controle que permitam o desenvolvimento desse comportamento malquisto.

É válido citar que, dentre todas as outras baterias, o custo das baseadas em lítio é maior, podendo inviabilizar uma aplicação por torná-la demasiadamente dispendiosa. Além do custo bruto das baterias, deve-se somar a isso a necessidade de controladores capazes de inferir segurança e balanceamento para um banco de baterias, o que torna ainda mais caro a compra do sistema completo.

Fatores desclassificatórios

- Custo.
- Prioridade de segurança máxima.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Veículos acessíveis às classes mais desfavorecidas.
- Um carro-forte elétrico

6.4.1.6 Zinco-ar

A incrível habilidade de tornar uma bateria primária viável no cenário dos veículos elétricos poderiam tornar as baterias de zinco ar ótimas competidoras com a capacidade de se tornarem majoritárias no mercado. O grande porém que não permite essa afirmação está na forma em que a recarga desse tipo de bateria é feita nos dias atuais: reposição do eletrólito de zinco de forma mecânica. A manutenção requerida por esse tipo de baterias é muito maior do que em qualquer outra tecnologia, o que é desaconselhável ao lidar com usuários sem o conhecimento técnico necessário para realizar as trocas de eletrólito de maneira segura e garantir um bom regime de operação.

Seu uso também é desaconselhável em operações que exijam um alto grau de eficiência, visto que a capacidade das baterias diminui sensivelmente com o aumento de temperatura e também com umidade alta. A auto descarga mensal também pode se encontrar em uma faixa não satisfatória.

Fatores desclassificatórios

- Manutenção.
- Eficiência.
- Ambientes com umidade alta
- Períodos longos sem utilização.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Veículo que circula em áreas de florestas densas com regimes de chuva constantes.
- Veículo de passeio comum cujo o proprietário não seja uma pessoa versada em funcionamento de baterias.

6.4.2 Motores

6.4.2.1 Corrente contínua

Apesar da simplicidade de operação, a necessidade de manutenção constante pode ser um fator determinante na classificação desse motor. As escovas de carbono precisam ser trocadas depois de certo período de utilização, provocando revisões periódicas e trocas ocasionais. A eficiência, em comparação com os demais motores, é bem menor, o que também pode influenciar na sua possibilidade de escolha de acordo com a necessidade de aptidão do sistema.

Por último é válido salientar que o torque de saída proporcionado por esses motores é o menor de todos, em comparação com os demais modelos que aqui foram apresentados na revisão bibliográfica.

Fatores desclassificatórios

- Manutenção.

- Eficiência.
- Toque de saída baixo

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Veículo elétrico esportivo.
- Veículo elétrico de competição.

6.4.2.2 Imã permanente sem escovas excitado por fonte de corrente direta

A quantidade de matéria prima utilizada para produzir os ímãs de alta capacidade de fluxo magnético é escassa, impossibilitando o uso desse recurso para a produção de veículos elétricos que utilizam esse tipo de motor em larga escala. O custo desse modelo se não o maior é um dos maiores, devido a necessidade de um controle exigente e à escassez da matéria prima do ímã.

A imprecisão de torque também é uma desvantagem que pode ser primordial para desqualifica-la no caso de existir exigência em certo valor constante de torque.

Fatores desclassificatórios

- Produção em larga escala.
- Custo.
- Precisão no torque.
- Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:
- Veículo popular elétrico.
- Frota de veículos dos correios.

6.4.2.3 Indução trifásica

O fator de potência encontrado nessa tecnologia impede um bom desempenho quando está se trabalhando com cargas muito baixas. Podem exigir manutenção periódica no caso dos motores com rotor bobinado. O torque de saída normalmente é muito superior do que aquele necessário; aplicações que necessitam de estar saindo da situação de repouso várias vezes durante o uso diminuem a eficiência desse motor, aumentando as perdas por calor e também por um excesso de corrente absorvida e desperdiçada.

A parte de controle exige o uso de sensores e encoders, o que contribui para o aumento da complexidade do sistema causando diretamente o aumento no custo. A necessidade de controle de velocidade, torque e fluxo auxilia no aumento do desempenho, porém ocasiona equitativamente aumento no valor do controlador.

Fatores desclassificatórios

- Manutenção.
- Eficiência.

- Custo
- Aplicações onde se retorna a posição de repouso repetidas vezes durante o funcionamento do sistema.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Veículo elétrico de carga.
- Veículo elétrico de centros urbanos que sofrem de engarrafamentos constantes.

6.4.2.4 Síncrono com escovas

Possui o controle mais exigente de todos os modelos até aqui observados, utilizando sensores para determinar tanto posição como velocidade, inversor de frequência e um complexo controle por vetores. Além disso, como nos motores de corrente direta, esse motor possui escovas de carbono, que exigem um processo de manutenção.

O problema mais sério é quanto a sua eficiência em plena carga; devido à necessidade de enfraquecimento de campo, esse tipo de motor não apresenta um bom desempenho quando requisitado a plena carga, o que também pode ocasionar aumento desnecessário da temperatura visto que a parte da corrente de magnetização está ligada as perdas por efeito Joule.

Fatores desclassificatórios

- Manutenção.
- Eficiência em plena carga baixa.
- Controle complexo.

Exemplos de aplicações que desclassificariam essa bateria:

- Veículo elétrico de carga.
- Veículo elétrico de competição.

6.4.2.5 Relutância chaveada

A mais promissora de todas as tecnologias apresentadas, porém muito nova no mercado e ainda em fase de pesquisa em vários quesitos, principalmente na parte de controle. Não se pode afirmar com 100% de certeza que todas as fragilidades de operação já foram encontradas para essa matriz, mas seu principal defeito encontra-se na instabilidade de torque, como apresentada pelos motores de ímãs permanentes sem escovas. Um controle feito de forma eficiente pode sanar essa questão, mas ainda assim esse é um problema inerente do tipo de motor.

Uma curiosidade interessante, que pode se tornar futuramente uma desvantagem em relação aos demais motores é que esse é o único modelo de motor elétrico que produz

poluição sonora. A quantidade de barulho causado é estonteante, chegando aos níveis dos motores de combustão interna.

Fatores desclassificatórios

- Pouca variedade no mercado.
- Incerteza de fragilidades.
- Precisão no torque.

Exemplo de aplicação que desclassificaria essa bateria:

- Empilhadeira de pallets elétrica.

Podemos resumir todos os empecilhos citados na tabela seguinte, que pode ser utilizada para decidir fatores classificatórios:

Tabela 6.7 - Fatores classificatórios

Sistema	Fator	Modelo excluído 1	Modelo excluído 2	Modelo excluído 3
Bateria	Espaço	Chumbo-Ácido	Níquel Cádmio	
Bateria	Peso	Chumbo-Ácido	Níquel Cádmio	
Bateria	Vibração	Chumbo-Ácido		
Bateria	Posição das baterias	Chumbo-Ácido		
Bateria	Percursos não regulares	Níquel Cádmio		
Bateria	Períodos longos sem utilização	Níquel Cádmio	Níquel Metal Hidreto	Zebra Zinco-ar
Bateria	Região tropical ou com temperatura ambiente alta	Níquel Metal Hidreto		
Bateria	Gasto energético	Zebra		
Bateria	Serviços imediatos sem cronograma prévio	Zebra		
Bateria	Custo	Baseadas em lítio		
Bateria	Segurança máxima	Baseadas em lítio		
Bateria	Manutenção	Zinco-ar		
Bateria	Eficiência	Chumbo-Ácido	Zinco-ar	
Bateria	Umidade alta	Zinco-ar		
Motor	Manutenção	DC	MIT*	SPM

Tabela 6.7 (continuação) - Fatores classificatórios

Motor	Eficiência	DC	MIT	
Motor	Torque de saída baixo	DC		
Motor	Produção em larga escala	PMBLDC		
Motor	Custo	PMBLDC	MIT	
Motor	Precisão no torque	PMBLDC	SRM	
Motor	Repouso diversas vezes	MIT		
Motor	Eficiência em plena carga	SPM		
Motor	Controle complexo	SPM		
Motor	Pouca variedade	SRM		
Motor	Incerteza	SRM		

Legenda: MIT*: Somente os motores de indução do tipo rotor bobinado

Aplicando os dados da tabela à metodologia de estudo de caso, de acordo com as premissas já observadas anteriormente, podemos listar os seguintes defeitos indesejados:

Tabela 6.8 - Fatores influenciadores do estudo de caso

Baterias	Motores
Espaço	Manutenção
Peso	Eficiência
Vibração	
Manutenção	
Eficiência	
Serviços imediatos sem cronograma prévio	

A partir da lista de defeitos indesejados, obtemos os modelos que foram desqualificados pelo método:

Tabela 6.9 - Modelos desclassificados

Baterias	Motores
Chumbo-Ácido	Indução trifásica com rotor bobinado
Níquel-Cádmio	Síncrono de imã permanente
Zinco-ar	De corrente direta
Zebra	

Conclui-se que o sistema otimizado de motor e baterias a ser então montado através do estudo de caso é utilizando-se as baterias de fosfato ferroso de lítio e o motor de relutância chaveada. As demais tecnologias de baseadas em lítio e o motor de imã permanente sem escovas são também boas opções.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

Na referência [26] encontramos ao final do artigo uma tabela com os mais representativos modelos de veículos elétricos que são usados nos dias de hoje, com informações da arquitetura de motor e do tipo químico de bateria. Utilizando como base de comparação para validação do método geral, e aplicando exclusão por serviços imediatos sem cronograma prévio (zebra), visto que vários veículos listado são de passeio ou de uso particular, de forma que é desejável que seja possível utilizar o sistema a qualquer momento. Outra exclusão é dos motores de relutância chaveada, tecnologia muito recente ainda em fase de testes chegou ao seguinte cenário:

Tabela 7.1 - Modelos mais utilizados de baterias e motores no mercado

Colocações	Baterias	Motores
1º Colocado	Base de Lítio (46 modelos)	Motor de indução trifásico (26 modelos)
2º Colocado	Chumbo-Ácido (13 modelos)	Motor síncrono de imã permanente sem escovas (14 modelos)
3º Colocado	Níquel Metal Hidreto (2 modelos)	Motor de corrente direta (8 modelos)
4º Colocado		Motor síncrono com escovas (3 modelos)

Tabela 7.2 - Ranking das notas método absoluto

Colocações	Baterias	Motores
------------	----------	---------

1º Colocado	Base Lítio	Motor de indução trifásico
2º Colocado	Níquel Metal Hidreto	Motor síncrono de imã permanente sem escovas & Motor de corrente direta
3º Colocado	Chumbo-Ácido	Motor síncrono de imã permanente sem escovas & Motor de corrente direta
4º Colocado		Motor síncrono com escovas

Os únicos desvios notados entre o método e a correlação com a análise de mercado está no caso das baterias de chumbo-ácido em comparação com as de níquel metal-hidreto. No caso, custo é um fator fundamental para a diferença e, apesar das baterias de níquel metal hidreto possuírem uma pontuação maior que às de chumbo ácido, o custo da mesmas é alto, mostrando uma tendência que existiu no mercado na busca de um banco de baterias cujo o preço fosse o menor possível e desprezando os demais fatores que aqui foram utilizados para a metodologia de otimização. No campo dos motores a resposta do mercado foi bem próximo do método, mostrando alto nível de adequação para as aplicações de caso geral.

Quanto ao estudo de caso, percebe-se que a escolha do projeto CICLAR (que foram baterias do tipo fosfato ferroso de lítio e motor síncrono de imã permanente sem escovas), apesar de não ser a melhor foi próximo do sistema otimizado, a única mudança proposta seria colocar o motor de relutância chaveada no lugar do síncrono de imã permanente sem escovas. A situação hipotética apresentada mostra que não existe um modelo que seja melhor em todos os sentidos que os demais, a dependência com o tipo de aplicação inferida podendo mudar completamente os índices das notas de motores e baterias.

Bibliografia

- [1] New Zeland Transpor Agency. CO2 Emission Ratings.[Internet]: Right Car: 2011 [acesso em : 24/02/2013] Disponível em: <<http://rightcar.govt.nz/co2-ratings.html>>
- [2] Pancaldi, Giuliano. **The Enlightenment and the Electric Battery**, Universidade de Bologna, Itália, [internet]; [acesso em: 23/06/2013] Disponível em: <<http://www.bu.edu/wcp/Papers/Tech/TechPanc.htm>>
- [3] Bocchi, Nerilso; Ferracin Luiz C., e Biaggio Sonia R., **Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental**, Química nova escola, Maio 2000 [internet]; [acesso em: 23/06/2013] Disponível em <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc11/v11a01.pdf>>
- [4] Dhameja, S. **ELECTRIC VEHICLE BATTERY SYSTEMS**. Estados Unidos: Butterworth–Heinemann. 2002
- [5] Linden, David e Reddy, Thomas B. **Handbook of batteries**. McGraw-Hill, 3ª Ed., 2002
- [6] Electropaedia. The Electropaedia [internet]; 2005 [acesso em 23/02/2013]. Disponível em: <<http://www.mpoweruk.com/>>
- [7] Battery University. Welcome to Battery University [Internet]; 2013 [acesso: 23/02/2013]. Disponível em: <<http://batteryuniversity.com/>>
- [8] Kularatna, N. **Rechargeable Batteries and Their Management: Part 30 in a series of tutorials on instrumentation and measurement**. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Abril 2011
- [9] Ogawa, V. **Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de baterias para uso na modelagem de sistemas de partida de veículo automotivo**. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia e Automação Elétrica. São Paulo, Julho, 2011, 92 pag.
- [10] Chen, M and Rincon-Mora, G. **Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance**. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, junho 2006
- [11] Sinopoly Battery. Sinopoly Lithium Ion Battery Specifications. HK Head Office. [acesso em: 24/02/2013] Disponível em: <<http://www.sinopolybattery.com/ClientResources/201203261108482.pdf>>

- [12] Desconhecido. **BATTERY TERMS & WHAT THEY MEAN**. Electus Distribution reference data sheet, 2001
- Parekh, R. **AC Induction Motor Fundamentals**. Microchip Technology Inc, 2003
- [13] Desconhecido, **A Guide to Understanding Battery Specifications**, MIT Electric Vehicle Team, Dez 2008
- [14] Corrosion Doctors. Gaston Planté [Internet]; 2012 [acesso em: 23/02/2013] Disponível em: < <http://www.corrosion-doctors.org/Biographies/PlantelBio.htm>>
- [15] **Wentzel, Constantin V. Vonwentzel. Comparing marine batteries (Gel, Absorbed glass mat (AGM), flooded lead acid)[internet]**; 2005 [acesso em 23/06/2013]. Disponível em:
<<http://www.vonwentzel.net/Battery/index.html>>
- [16] Hoffart, Fran. **Fast, High Efficiency, Standalone NiMH/NiCd Battery Charging**. Linear Technology, Design Note 380 [internet]; [acesso em 23/06/2013]. Disponível em:
< <http://cds.linear.com/docs/en/design-note/dn380f.pdf>>
- [17] Sullivan, T, Bingham, C, Clark, R. **Zebra Battery Technologies for the All Electric Smart Car**. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006
- [18] Dustmann, Cord-H. **Advances in ZEBRA batteries**. Journal of Power Sources 127 (pags 85-92), 2004
- [19] Hales, P. Dell laptop explodes at Japanese conference.[Internet] The Inquirer: 2013 [acesso em 24/02/2013] Disponível em:
<<http://www.theinquirer.net/inquirer/news/1042700/dell-laptop-explodes-japanese-conference>>
- [20] Kim, B, Tredeau, F, Salameh Z. **Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles**. Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, Set 2008
- [21] Kim, B, Tredeau, F, Salameh Z. **Realistic Electric Vehicle Load Test for Lithium Polymer Batteries**. Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, 2008
- [22] Omar, N et al. **Assessment of Performance of Lithium Iron Phosphate Oxide, Nickel Manganese Cobalt Oxide and Nickel Cobalt Aluminum Oxide Based cells for Using in Plug-in Battery Electric Vehicle Applications**. Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, 2011

- [23] Jonathan R. Goldstein and Binyamin Koretz. **Tests of a Full-Sized Mechanically Rechargeable Zinc-Air Battery in an Electric Vehicle**. AES Systems Magazine, Nov 1993
- [24] Doppelbauer, Martin. **A short history of electric motors**. University of the State of Baden-Wuerttemberg and National Research Center of the Helmholtz Association, 20 Dez 2012
- [25] Chapman, S. **Electric Machinery Fundamentals**, 4^a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, Jan 2004. P.303
- [26] Santiago, J et al. **Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, nº. 2, fev 2012
- [27] Xue, X, Cheng, K and Cheung, N. **Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles**. Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008
- [28] Condit, Reston. **Brushed DC Motor Fundamentals**. Microchip Technology Inc., Nota de aplicação N° 905, 2010
- [29] Brown, Ward. **Brushless DC Motor Control Made Easy**. Microchip Technology Inc., Nota de aplicação N° 857, 2011
- [30] Parekh, Rakesh. **AC Induction Motor Fundamentals**. Microchip Technology Inc., Nota de aplicação N° 887, 2003
- [31] Ishak, Dahaman e Hassan, Anwar H. A., **Analytical modeling of permanent magnet excited brushed dc motor for low-cost applications**
- [32] Hill, Chris. **An Introduction to Low Voltage DC Motors**. Philips Semiconductors, Nota de aplicação N° 10293_1, 2004
- [33] Desconhecido, **Electronics Tutorial about DC Motors**. [internet] [acesso em 23/06/2013], Disponível em < http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_7.html>
- [34] Torres, Daniel e Zambada, Jorge **Single-Shunt Three-Phase Current Reconstruction**
- Algorithm for Sensorless FOC of a PMSM**. Microchip Technology Inc., Nota de aplicação N° 1299, 2009
- [35] Salomäki, Janne; Piippo, Antti; Hinkkanen, Marko e Luomi Jorma. **Sensorless Vector Control of PMSM Drives Equipped With Inverter Output Filter**. Power Electronics Laboratory, Helsinki University of Technology
- [36] Kirtley Jr, James L. **Class Notes 7: Permanent Magnet \Brushless DC" Motors**. Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Fev. 2004

[37] Desconhecido, **Switched Reluctance (SR) Motor**. . [internet] [acesso em 23/06/2013], Disponível em:

<<http://www.microchip.com/pagehandler/em-us/technology/motorcontrol/motortypes/sr.html>>

[38] Rajani, Kandipati; Naumburi, Priyatam A.; Mastanbi, Shaik e Chaitanya, Koppula R. **MODELLING AND CONTROL OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR**. Department of Electrical & Electronics Engineering VIGNAN'S ENGINEERING COLLEGE, Kakinada, Andhra Pradesh, 2011

[39] Gruber, P et al. **Global Lithium Availability**. Journal of Industrial Ecology, Vol 00, nº 00, 2011

[40] U.S. Environmental Protection Agency. Federal Tax Credits for Electric Vehicles. [Internet] U.S. Department of Energy; 2010 [acesso em: 23/02/2013]. Disponível em:

<<http://www.fueleconomy.gov/feg/taxevb.shtml>>

[41] Salt Institute. About Salt.[Internet]: 2011 [acesso em: 24/02/2013] Disponível em: <http://www.saltinstitute.org/About-salt>